

new Docket No.: 444.26.01

2671  
PATENT

IN THE UNITED STATES PATENT AND TRADEMARK OFFICE

Application of

Jean-Luc Nougaret

Appln. No. 09/823,441

Filed: March 30, 2001

For: METHOD AND APPARATUS FOR  
PRODUCING A COORDINATED  
GROUP ANIMATION BY MEANS OF  
OPTIMUM STATE FEEDBACK, AND  
ENTERTAINMENT APPARATUS  
USING THE SAME

Assistant Commissioner for Patents  
Washington, D.C. 20231

Sir:

Enclosed is the Japanese certified priority document No. 2001-088013 for the above-specified patent application submitted under 35 U.S.C. § 119(b).

) Group Art Unit: 2671  
)  
) Examiner: Not Yet Assigned  
)  
) TRANSMITTAL OF CERTIFIED  
) PRIORITY DOCUMENT  
)  
)  
)

CERTIFICATE OF MAILING UNDER 37 CFR § 1.8

I hereby certify that the correspondence enclosed herein is being deposited as first class mail with the U.S. Postal Service on December 27, 2001, in an envelope addressed to:

Asst. Commissioner for Patents  
Washington, D.C. 20231.

By: C. Wilson  
C. Wilson

Respectfully submitted,  
DERGOSITS & NOAH LLP

Dated: December 27, 2001

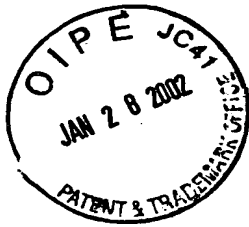
By: Paul K. Tomita  
Paul K. Tomita  
Reg. No. 43,196

DERGOSITS & NOAH LLP  
Four Embarcadero Center, Suite 1150  
San Francisco, CA 94111  
(415) 705-6377

RECEIVED

FEB 04 2002

Technology Center 2600



日 本 国 特 許 庁  
JAPAN PATENT OFFICE

別紙添付の書類に記載されている事項は下記の出願書類に記載されている事項と同一であることを証明する。

This is to certify that the annexed is a true copy of the following application as filed with this Office

出 願 年 月 日

Date of Application:

2001年 3月26日

出 願 番 号

Application Number:

特願2001-088013

出 願 人

Applicant(s):

株式会社ソニー・コンピュータエンタテインメント  
ソニー株式会社

RECEIVED

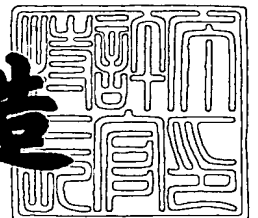
FEB 04 2002

Technology Center 2600

2001年11月30日

特 許 庁 長 官  
Commissioner,  
Japan Patent Office

及 川 耕 造



出証番号 出証特2001-3105486

【書類名】 特許願

【整理番号】 SCEI00322

【提出日】 平成13年 3月26日

【あて先】 特許庁長官殿

【国際特許分類】 A63F 9/22

【発明の名称】 最適状態フィードバックにより協調化された群集アニメーション生成方法及び装置並びにそれを用いたエンターテイメント装置

【請求項の数】 13

【発明者】

【住所又は居所】 東京都品川区北品川6丁目7番35号 ソニー株式会社内

【氏名】 ヌガレ ジャン・リュック

【発明者】

【住所又は居所】 東京都品川区北品川6丁目7番35号 ソニー株式会社内

【氏名】 戸塚 卓志

【発明者】

【住所又は居所】 東京都港区赤坂7丁目1番1号 株式会社ソニー・コンピュータエンタテインメント内

【氏名】 萩原 馨

【特許出願人】

【識別番号】 395015319

【氏名又は名称】 株式会社 ソニー・コンピュータエンタテインメント

【特許出願人】

【識別番号】 000002185

【氏名又は名称】 ソニー株式会社

【代理人】

【識別番号】 100084032

【弁理士】

【氏名又は名称】 三品 岩男

【電話番号】 045(316)3711

【選任した代理人】

【識別番号】 100087170

【弁理士】

【氏名又は名称】 富田 和子

【電話番号】 045(316)3711

【先の出願に基づく優先権主張】

【出願番号】 特願2000- 95372

【出願日】 平成12年 3月30日

【手数料の表示】

【予納台帳番号】 011992

【納付金額】 21,000円

【提出物件の目録】

【物件名】 明細書 1

【物件名】 図面 1

【物件名】 要約書 1

【包括委任状番号】 9912211

【プルーフの要否】 要

【書類名】 明細書

【発明の名称】 最適状態フィードバックにより協調化された群集アニメーション生成方法及び装置並びにそれを用いたエンターテインメント装置

【特許請求の範囲】

【請求項 1】

複数の個体からなる群集のアニメーションを生成する方法であって、  
予め定められた各個体の動特性に基づいて、各個体の状態を時間ステップごとに決定する連続処理工程と、

当該群集全体で実現すべき全体状態に関する指示を外部から受け付け、該受け付けた全体状態に応じて各個体に、当該群集内での役割を割り当てる離散処理工程とを備え、

前記離散処理工程によって新たな役割が各個体間に割り当てられた場合、前記連続処理工程では前記新たに割り当てられた役割に応じて各個体の動的状態を調整すること

を特徴とする群集アニメーション生成方法。

【請求項 2】

請求項 1 に記載の群集アニメーション生成方法において、

前記離散処理工程は、その時点で各個体に割り当てられている役割を個体間で交換する役割交換工程を含み、

前記役割交換工程は、予め定めたトリガー条件が満足された場合、あるいは当該群集全体の評価指数が役割交換により向上できると判断された場合に実施されること

を特徴とする群集アニメーション生成方法。

【請求項 3】

請求項 1 に記載の群集アニメーション生成方法において、

前記離散処理工程では、当該群集全体の評価指数を最小化あるいは削減が図られるように、各個体の役割を決定すること

を特徴とする群集アニメーション生成方法。

【請求項 4】

請求項2に記載の群集アニメーション生成方法において、  
前記群集全体の評価指数がエネルギーであること  
を特徴とする群集アニメーション生成方法。

【請求項5】

請求項2に記載の群集アニメーション生成方法において、  
前記役割交換工程では、評価指数がもっとも低い複数の個体を選択し、該選択  
した複数の個体間で役割交換を実施すること  
を特徴とする群集アニメーション生成方法。

【請求項6】

請求項2に記載の群集アニメーション生成方法において、  
前記役割交換工程は、外部からの指示に応じて、予め定めた時間間隔の間だけ  
役割交換の実施に係わる演算処理を抑制する工程をさらに含むこと  
を特徴とする群集アニメーション生成方法。

【請求項7】

複数の個体からなる群集のアニメーションを生成する装置であって、  
予め定められた各個体の動特性に基づいて、各個体の状態を時間ステップごと  
に決定する連続処理手段と、

当該群集全体で実現すべき全体状態に関する指示を外部から受け付け、該受け  
付けた全体状態に応じて各個体に、当該群集内での役割を割り当てる離散処理手  
段とを備え、

前記離散処理手段によって新たな役割が各個体間に割り当てられた場合、前記  
連続処理手段は、前記新たに割り当てられた役割に応じて各個体の動的状態を調  
整することを特徴とするアニメーション生成装置。

【請求項8】

交換可能な複数の個体からなる群集をシミュレートするエンターテインメント装  
置であって、

予め定められた各個体の動特性に基づいて、各個体の状態を時間ステップごと  
に決定する連続処理手段と、

当該群集全体で実現すべき全体状態に関する指示を外部から受け付け、該受け

付けた全体状態に応じて各個体に、当該群集内での役割を割り当てる離散処理手段とを備え、

前記離散手段によって新たな役割が各個体間に割り当てられた場合、前記連続処理手段は、前記新たに割り当てられた役割に応じて各個体の動的状態を調整することを特徴とするエンターティメント装置。

【請求項9】

交換可能な複数の個体からなる群集をシミュレーションするシステムの制御方法であって、

予め定められた各個体の動特性に基づいて、各個体の状態を時間ステップごとに決定する連続処理工程と、

当該群集全体で実現すべき全体状態に関する指示を外部から受け付け、該受け付けた全体状態に応じて各個体に、当該群集内での役割を割り当てる離散処理工程とを備え、

前記離散処理工程によって新たな役割が各個体間に割り当てられた場合、前記連続処理工程では前記新たに割り当てられた役割に応じて各個体の動的状態を調整すること

を特徴とする群集シミュレーション制御方法。

【請求項10】

N個（Nは2以上の自然数）の個体からなる群集のシミュレーションにおいて、予め定められた状態空間中の初期配置から目的とする配置へ移動させる場合に、該群集の動きを制御する方法であって、

a) 最短距離での移動が行われるように、前記初期配置にある各個体を、前記目的配置中の各個体位置に割り当てる手順、

b) 手順aでの割り当てに従い、前記初期配置にある個体を移動させる手順、

c) 手順bでの移動に際して、前記各個体がそれぞれ割り当てられた前記目的配置に到達するまでの動きについて、予め定められた評価関数の値を算出する手順、

d) 前記評価関数の値が大きいものからK個（KはN以下の自然数）の個体を選択する手順、および

e) 前記選択した  $K$  個の個体から得られる  $K!$  の組み合わせの中で、前記目的配置への割り当てを組み替える手順を含み、

手順 e の後に手順 b へ戻り、手順 b ～手順 e の手順を繰り返すことを特徴とする群集の動きの制御方法。

【請求項 11】

複数の個体からなる群集のアニメーションを情報処理装置に生成させるためのプログラムであって、

予め定められた各個体の動特性に基づいて、各個体の状態を時間ステップごとに決定する連続処理工程と、

当該群集全体で実現すべき全体状態に関する指示を外部から受け付け、該受け付けた全体状態に応じて各個体に、当該群集内での役割を割り当てる離散処理工程とを情報処理装置に実行させ、

前記離散処理工程によって新たな役割が各個体間に割り当てられた場合、前記連続処理工程では前記新たに割り当てられた役割に応じて各個体の動的状態を調整する処理を情報処理に実行させるためのプログラム。

【請求項 12】

$N$  個 ( $N$  は 2 以上の自然数) の個体からなる群集のシミュレーションにおいて、予め定められた状態空間中の初期配置から目的とする配置へ移動させる場合に、該群集の動きを制御する処理を情報処理装置に実行させるためのプログラムであって、

以下に示す処理 a ～処理 e の後に処理 b へ戻り、処理 b ～処理 e の処理を繰り返すことを情報処理装置に実行させることを特徴とするプログラム。

a) 最短距離での移動が行われるように、前記初期配置にある各個体を、前記目的配置中の各個体位置に割り当てる処理、

b) 手順 a での割り当てに従い、前記初期配置にある個体を移動させる処理、

c) 手順 b での移動に際して、前記各個体がそれぞれ割り当てられた前記目的配置に到達するまでの動きについて、予め定められた評価関数の値を算出する処理、

d) 前記評価関数の値が大きいものから  $K$  個 ( $K$  は  $N$  以下の自然数) の個体を



選択する処理、

e) 前記選択したK個の個体から得られるK!の組み合わせの中で、前記目的配置への割り当てを組み替える処理。

【請求項13】

請求項11または請求項12に記載したプログラムを記録した情報処理装置読取可能な記録媒体。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】

本発明は、複数の個体の集まりである群集、集団や群れ等の動きを擬似的に表現するアニメーションの生成方法に係わり、特に、群集全体の動きを制御可能する方法および装置、並びにその方法を利用したエンターテインメント装置に関する。

【0002】

【従来の技術】

コンピュータ・グラフィクスにおいて、従来の技術は以下の2つの分野に属する。1つはグループ・アニメーションであり、もう1つは物理的アニメーション (physically based animation) である。

【0003】

ここで、物理的アニメーションとは力学法則などの物理学の原理に準じて生成されるアニメーションである。より具体的には、アニメーションによって表現しようとする各個体について、ニュートンやラグランジュの法則を適用して運動方程式（被線形方程式、連立方程式、微分方程式など）を求める。ただし、力学的あるいは物理学の運動を忠実にシミュレーションすることはコストがかかるため、本発明が関連する技術分野であるコンピュータ等の情報処理装置やエンターテインメント装置の分野では、通常、何等かの簡略化が成されている。

【0004】

このため上述した技術分野では、物理学的に正確な運動モデルを設定する必要はなく、対象となる個体の動きをリアルタイムで算出でき、かつ、その個体の自

然な動きを示すことができるものであれば、準物理学的なモデルによる運動方程式でも用いることができる。

#### 【0005】

##### (1) 集団的ふるまいを示すグループ・アニメーション

Reynolds (C.W. Reynolds. Flocks, herds, and schools: A distributed behavioral model. Proceedings of Siggraph 87, Jul. 1987, 25-34) による影響力の高い研究が行われて以来、鳥や動物や魚の群れのアニメーションは、自律的な個体をプログラミングすることで実施されている。各個体のふるまいに関するパラメータを調整することで、何らかの離散的制御が実行可能であるが、群れ全体で見た場合、現れてくる集団的ふるまいのほとんどは自然発生的なものである。

#### 【0006】

生物機械的なふるまいのシミュレーションを使用して、TuとTerzopoulos (X. Tu and D. Terzopoulos. Artificial Fishes: Physics, locomotion, perception and behavior. Proceedings of Siggraph 94, Jul. 1994, 24-29) は、個体の群れ及び知覚を通してのリアリティを大きく改善し、よりもっともらしい群集アニメーションを作成した。このような先駆的研究では、刺激-応答に関する規則の組み合わせを適用することで、より自然な魚や動物の群れのふるまいを合成することができることを示した。

#### 【0007】

また、人工知能技術に触発されて、Funge, Tu, Terzopoulos (J. Funge, X. Tu and D. Terzopoulos. Cognitive Modeling: Knowledge, Reasoning and planning for Intelligent Characters. Proceedings of Siggraph 99, Jul. 1994, 29-38) が、認知可能な個体のふるまいを示す非常にエレガントな枠組みを提案し、みごとなデモンストレーションを行った。彼らが目的としていた人工生命とそのふるまいを示すアニメーションの生成という点においては、成功をおさめている。

#### 【0008】

##### (2) 動的及び物理学的グループ・アニメーション

一方、動的及び物理学的アニメーションは、安定性および制御の点で大きな問題があり、それらの問題点は群集に含まれる個体数が大きくなるほど悪化する。群集の動きは複雑であり、この複雑性を数学的に表すことは非常に難しいとされてきたが、先頃、二人の物理学者TonerとTu (J. Toner, Y. Tu. Flocks, herds, and schools: A quantitative theory of flocking. Physical Review Letters . Vol. 58. 1999) が、数学的モデルを使用して、どのようにして協調的な群集的ふるまいが自然発生するかを説明した。群集の動きに関する理解を深めることは重要であり、コンピュータ・アニメーションの分野においては、群集に対する動的制御を効率的に強制する方法が求められている。

## 【 0 0 0 9 】

BroganおよびHodgins (D. Brogan and J. Hodgins. Group behaviors for systems with significant dynamics. Proceedings of the 1995 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, vol.4,528-534: D. Brogan and J. Hodgins. Group behaviors for systems with significant dynamics. Autonomous Robots 4(1)..1997. Pp137-153) は、動的レベルの高い群集のふるまいを研究し、問題の複雑性についての考えをしめした。彼らによると、個体レベルの動きと局所的な相互作用により群集全体への制御は困難となっており、各個体を駆動させるための効率的制御を実施するには、地域的（ローカル）な知識と全体的（グローバル）な知識を合わせたものが必要となる。

## 【 0 0 1 0 】

## 【発明が解決しようとする課題】

しかしながら、上記BroganおよびHodginsの研究は、アニメーションの分野だけでなく、現実的な運動方程式が適用されるロボット技術の分野にも適用して、実世界に即した群集的ふるまいの動的制御を実現しようとするものである。このため、例えばアニメーションのように、目的に応じて個体の動きを任意のレベルまで簡略化できるような、特定の技術分野への適用は考慮されていない。

## 【 0 0 1 1 】

また、上記従来技術では、制御係数の調整を実験を交えた手作業により決定しており、その自動化はいまだ図られていない。

## 【0012】

本発明は上述したような従来技術の問題点を考慮してなされたもので、群集アニメーションにおける動的制御を可能とするアニメーションの生成方法および装置、およびその方法を用いて生成されたアニメーションを使用するエンターテインメント装置を提供することを目的とする。

## 【0013】

## 【課題を解決するための手段】

上記目的を達成するために本発明は、複数の個体からなる群集のアニメーションの生成方法および装置において、（１）予め定められた各個体の動特性に基づいて、各個体の状態（位置や動的状態など）を所定の時間ステップごとに決定する連続処理と、（２）当該群集全体で実現すべき全体状態（例えば群集全体の形状や動的状態など）に関する指示を外部から受け付けて、該受け付けた全体状態に応じて各個体に、当該群集内での役割を割り当てる離散処理とを備え、（３）前記離散処理によって新たな役割が個体間に割り与えられた場合、前記連続処理では新たに割り当てられた役割に応じて各個体の動的状態を調整することを特徴とする。

## 【0014】

また、上記目的を達成するために本発明は、ユーザの指示および操作を入力するための入力部と、前記入力された指示および操作に応じて予め記憶されているエンターテインメント・プログラムを実行する実行部と、前記実行の結果を出力する出力部とを備えたエンターテインメント装置において、前記実行部に上述した本発明による群集アニメーション生成方法を用いて群集アニメーションを生成し、該生成したアニメーションを前記出力部に表示させることを特徴とする。

## 【0015】

## 【発明の実施の形態】

以下、本発明を適用した動的制御により個体間の運動を協調化し、所望の群集的ふるまいの具現することを可能にする群集アニメーションの生成方法および装置と、それらを利用したエンターテインメント装置の各実施の形態について、図面を参照して説明する。

## 【0016】

## (A) 群集アニメーションの生成方法および装置

群集レベルの連携動作をもっとも適切に表している例として、魚や動物の群れに見られるような組織的または協調的ふるまいがあるが、その一方で、例えばフルスピードで崖から落ちていく群れの例もあり、表面に現れている群集の組織的ふるまいが、完全に制御されているとはいいがたい。

## 【0017】

自然界においては、群集全体に対する制御系統がまったく存在しない場合、その群集を構成する各個体の相対的運動は局所的な相互作用により厳しく制約されており、また、その局所的相互作用が、目的とする行動というよりはその副産物として現れる、多くの集団的ふるまいにおいて支配的である。

## 【0018】

本実施形態では、一例として、物理的モデルと動的シミュレーションによって、魚、動物などの群れをアニメーション化する。また、群れの本質的な性質が貧弱に制御されており、群れのふるまいは潜在的に不安定な動的システムでのふるまいであるとする。本実施形態では、これらを考慮した上で、群集の動きに関する物理学的特性をアニメーションの生成に反映させようとするものである。

## 【0019】

(A-1) 動的群集の動き (Dynamic Group Motion) を用いる動機づけ 本明細書の説明では、動的 (ダイナミックス) という用語は、一般的なダイナミック・システムの意味で使用されている。これは、物理学的なモデルや準物理学的なモデルに加え、そのふるまいが微分方程式と有限差分方程式の組み合わせや、有限状態装置などにおける離散事象成分等まで含んで、数学的に記述されるようなモデルにも適用される。

## 【0020】

コンピュータ・アニメーションにおいて、動特性の適用は、非常に多くの個体を備えた群集の動きを合成する場合の面倒な手作業に取って替わるものである。群集の動きについては、軌道に基づく表現ではなくモデルに基づく表現を用いることにより、設計段階での様々な要求に対して柔軟に対応することができる。こ

れは、動作環境やシナリオを何回も変更するたびに、その変更に応じた軌道を計算することが容易となるためである。

#### 【0021】

対話型アニメーションとテレビゲームへの、動特性に基づく群集アニメーションの応用は、予測不可能なユーザ入力によってゲーム実行時に引き起こされうる無限の事象を考慮すると、非常に有効であると考えられる。一方、群集の動きをシナリオや操作者（プレイヤー）の制御下におき、群集が非協調的な混乱状態に陥らないようにするためには、自然発生的ではなく、達成すべき目的に合致させるように、群集の協調化を行わせることが必要となる。

#### 【0022】

##### （A-2）主な改善点

群集をアニメーション化する場合、自律的な個体を用いた方法では、その個体からなる群集をシナリオに正確に従わせるよう制御することが難しくなる。正確な時間と精度で群集を形成させ所定の形態とするには、全体的制御と協調化に関する指示が有効であり、以下のような複数の改善が必要になる。

#### 【0023】

第1に、組織的なふるまいを具現化するために必要な個体軌道間の高精度な協調化は、本質的には連続的制御における課題である。したがって、離散的なふるまいや経験的知識に基づくルールにより動作している計画や推論エンジンを、現在行われているよりもさらに強く、連続的世界と関連付けることがより望ましい。第2に、物理的アニメーションでは、動的システムの本質的問題、例えば安定性や制御性の問題などが繰り返し現れてくる。本実施形態ではこれらの点を考慮した上で、以下のような点で改善を行う。

#### 【0024】

1. 協調化された群集の動きに対する統一的法則：群集全体の動きあるいは状態を指定するための統一的・基礎的表現として、状態空間レイアウトの概念を導入する。そして、動的状態が分散し安定化のための効率的な制御が必要な場合に対して、連続処理および離散処理からなるハイブリッド法則の適用を提案する。

#### 【0025】

2. ランタイム時の協調化アルゴリズム (Coordination Algorithm) : アニメーションを大きなかたまりとみなして処理するのではなく、各フレーム毎に個体毎の制御を実施可能とし、個体数の少ない小さな群集に対してリアルタイムで性能を発揮することができる、協調化アルゴリズムを提案する。

【 0 0 2 6 】

3. 動的モデルの調整に関するガイドライン : 上記協調化アルゴリズムの最適性能を線形動特性において保証する。また、より複雑な動特性に対しては、非線形性をうまく避けて良好な性能を維持するための動的モデルの調整方法に関するガイドラインを提案する。

【 0 0 2 7 】

4. デモンストレーション : 動的レベルが高い例で、制御性と安定性の問題のため、他の方法ではおそらく同じレベルの精度と制御が得られないものを示す。図 1 はその一例で、Tu と Terzopoulos (X. Tu and D. Terzopoulos, Artificial Fishes: Physics, locomotion, perception and behavior, Proceedings of Siggraph 94, Jul. 1994, 24-29) による先駆的な成果を、本発明によって再現したものである。ここでは、協調化された群集運動が高精度の動特性と組織的ふるまいのアニメーションの一般的な枠組みに寄与しており、群れは外乱にもかかわらず離散せず、その形態を維持している。本図では、物理的な動特性を備えた魚の群れが流れに向かって泳いでいる状態を、光線によって照らし出している。

【 0 0 2 8 】

(A-3) 課題について

本実施形態では、群集の協調性 (group coordination) を、動的個体と対話型シナリオとの間に位置する仲介層として分離した。本協調化処理では、与えられた群集レベルの指示に応じて、その役割と制御指示を各個体に対して発行することで、群集の形成を実現し、あるいは所望の形態をとるよう制御を行う。

【 0 0 2 9 】

本実施形態における最初の仮定は、群集レベルの状態 (全体的状態) に関する指示がレイアウト、すなわち、状態空間の動作点の組み合わせとして発行可能であるということにある。この概念を説明する前に、群集形成の指示とその制御は

、次のリストに含まれる方法や、これら以外のさまざまな手法によって記述することができることを説明する。

### 【0030】

(イ) 全世界的、局所的あるいはフレーム毎に表された、ラベル付けされたあるいはラベル付けされていない各個体の目標位置の組み合わせ

(ロ) 群集の形成やその形態の取り方に関する逐語的記述

(ハ) 所定の場面における個体密度の再分配マップ

(ニ) 一般的な速度ベクトルのような運動レベルの指定

上述した可能性を示すために、群集が状態空間において、時間とともにどのように展開するかについて次に説明する。ここで、群集（グループ）とは、個別の運動変数がそれぞれの状態ベクトル内に集められた個体の集合として捉えるものとする。

### 【0031】

高さ（ベクトル・サイズ） $n_e$ の個体状態ベクトル $x_n^i$ には、時間ステップ $n$ における、個体 $i$ の自由度およびその動的状態を示す1次導関数を始め、その物理的、準物理的、あるいは運動の内部状態を記述するすべての変数が含まれている。さらに、個体状態ベクトルは、全体として群集を現す $N \cdot n_e$ の高さを持った単一状態ベクトル $X_n = [x_n^1, x_n^2, \dots, x_n^N]^T$ に統合される。この考え方においてレイアウトは、個別の個体にも目的とする配置（ターゲット・レイアウト）にも直接リンクせず、群集全体に対するレイアウトのブラインド割り当てを行うための、 $N$ 個のラベル付けされていない動作点の分布、すなわちベクトル $X_{ref} = [x_{ref}^1, x_{ref}^2, \dots, x_{ref}^N]^T$ となる（図2の200参照）。

### 【0032】

上記ターゲット・レイアウトを実現するために実施される、各個体への実際の役割割り当ては、ターゲットの再整理により個体間に役割を分配する役割割り当てスイッチボード（Role assignment switchboard：図2の201参照）によって決定される。ここではこれを $_n X_{ref}$ として表し、それにおいて $N \cdot n_e \times N \cdot n_e$ のマトリクス $_n$ は、ターゲットと個体の間の全単写（bijection）となる時間 $n$ における役割割り当てを表す（R. Grimaldi, Discrete and combinatorial mathematic



s. Addison-Wasley, NewYork.1999) 。

【0033】

このようなマトリクス表現は、線形代数に頼る本実施形態の説明の残りの部分と良好に適合するが、単純なマッピング・テーブルでも十分な場合がある。このため実際のシステムにおいては、マトリクス表現を必ずしも採用する必要はない。たとえば、個体 1, 2, 3, 4, 5 のそれぞれに対するターゲット割り当て 1, 4, 2, 3, 5 (可能性のある  $5! = 120$  の全単写からの選択) は、次のように記述することができる：

**【0034】**

【数 1】

## 数 1

$$\pi_n \cdot X_{ref} = \begin{bmatrix} \begin{matrix} x_{ref}^1 \\ x_{ref}^4 \\ x_{ref}^2 \\ x_{ref}^3 \\ x_{ref}^5 \end{matrix} & \begin{matrix} \begin{bmatrix} 100 \\ 000 \\ 001 \end{bmatrix} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \begin{bmatrix} 100 \\ 000 \\ 001 \end{bmatrix} & 0 \\ 0 & \begin{bmatrix} 100 \\ 000 \\ 001 \end{bmatrix} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \begin{bmatrix} 100 \\ 000 \\ 001 \end{bmatrix} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \begin{bmatrix} 100 \\ 000 \\ 001 \end{bmatrix} & 0 \end{matrix}$$

..... (数1)

【 0 0 3 5 】

また、本実施形態では、本発明によるハイブリッド最適フィードバックの課題

に関して以下（イ）～（ハ）のように考えるものとする。

【0036】

（イ）個別の動特性および結合された条件反射的行動が非線形写像 $f$ として次のように集合的に表される $N$ 個の個体のセットを考える：

【0037】

【数2】

数2

$$X_{n+1}=f(X_n, U_n) \dots\dots (\text{数2})$$

【0038】

（ロ）その群集の状態空間 $X_{\text{ref}}$ 内におけるターゲット状態として、ユーザあるいはゲームのシナリオにより強制的に決定される、いわゆるオンザフライで指定されるレイアウトを考える。

【0039】

（ハ）群集を形成し、最良のパフォーマンス（例えば、時間応答性と個体によって消費されるエネルギーのトレードオフ）を実現するレイアウトに向かって展開する、協調化された制御 $U_n=g(X_n, n, X_{\text{ref}})$ を求める。これは、次に示すハイブリッド（連続-離散）問題として解釈される：

（ハ-1）連続部分：制御 $U_n$ を使用し、 $n \cdot X_{\text{ref}}$ に向けて $X_n$ を駆動制御する一方、ある特定のエネルギーと時間のトレードオフ関数 $J$ を最小に抑える。なお、前記のような積分コストを示す関数 $J$ の代わりに、最適レギュレータ（LQ）問題における2次形式の評価関数を用いてもよい。

【0040】

（ハ-2）離散事象部分：個体間に割り当てられた役割交換の機会を見つける。すなわち $n$ の役割交換がパフォーマンスを向上する（例えば、コスト関数 $J$ の減少を促進する）と判断された場合には、それを実施する。具体的には、現在の個体間の役割を維持した場合のコスト $J$ を算出し、その後、後述するパフォーマンスが最も低い $K$ 個の個体間で役割交換が実施された場合のコスト $J^*$ を算出し、これらを比較することにより、役割交換によりパフォーマンスが向上するかの判

断を下す。ここで、全体の個体数 $N$ が小さい場合には、 $K=N$ とすることも可能であるが、 $N$ が大きい場合は、 $K < N$ として $K$ 個の個体間でのみ役割交換を行う。

#### 【0041】

なお、上述した本発明によるハイブリッド最適フィードバックの課題の捉え方においては、グループ・アニメーションが擁する膨大な問題から、群集レベルの制御を実現するための各個体の協調化という問題だけを、意図的に分離している。動的効果が優勢であることを前提とすると、動的システムおよび制御の観点からそれが定式化され、IA駆動によるマルチエージェントまたはコーポラティブロボット工学において通常見られる高レベルのレイヤ（プランニングおよび認識）から個体を分離するが、そのことは、ここに説明するシステムと関連させたその種のレイヤの使用を除外することを意味しない。

#### 【0042】

図2に、本発明によるハイブリッド最適フィードバックによる制御を実現するシステムの一例のブロック構成図を示す。本例のシステムは、役割割り当てスイッチボード201と、ハイブリッド協調化処理部202と、個体状態決定部204とを備えている。

#### 【0043】

役割割り当てスイッチボード201は、外部からの要求に応じて設定した群集レベルでの特定状態を指定するレイアウト200に応じて、当該群集を構成する各個体にレイアウト200を実現するために必要な役割をそれぞれ割り当てる。

#### 【0044】

ハイブリッド協調化処理部202は、最適連続制御部202aと最適離散役割割り当て部202bとを備える。最適連続制御部202aは、役割割り当てスイッチボード201で各個体の役割が割り当てられた参照状態において、現在の群集状態に基づいた連続フィードバックループ制御を実施し、各個体の状態を連続的に決定する。最適離散役割割り当て部202bは、所定のタイミングあるいは外部からの指示あるいは群集の現状（スナップショット）に応じて、各個体の役割の再割り当てを実行させるように、役割割り当てスイッチボード201を制御する。

## 【0045】

個体状態決定部204は、最適連続制御部202aで決定された各個体の状態に基づく動特性を記述した変数群 $E_i$ や、全世界的な外乱や個体間の相互作用から、各個体の状態をそれぞれ求め、現時点での群集の状態を決定する。

## 【0046】

図2のハイブリッド協調化処理において、カプセル化された個体の概念を折り込み、個体の内部動特性を考慮することは、フィードバック設計を行う上で有益である。協調化は対話型シナリオと個体の間の「クラッチ」として作用する。また、群集はブラックボックスではなく、ホワイトボックス（既知構造のモデル）として捉えている。

## 【0047】

図2のハイブリッド協調化処理によれば、離散적および連続的な動きの協調化により、離散的なプランニングと連続的な動特性との間のインターフェースが実現可能となる。

## 【0048】

例えば、図3に示すように、本発明によるハイブリッド協調化処理から恩恵を受けるケースは多く存在する。図3に示すような集団化されたフライトは、パイロット間で協調化された操作が必要となるが、連続フィードバック制御が離散的決定より優勢になることから、従来の合成規則ベース・システムによる再現は困難となろう。図3に示す協調化されたフライト・アニメーションの詳細は後述する。

## 【0049】

## (A-4) 理論的背景

本発明は、Panne、FiumeおよびVraesic (M van de Panne, E. Fiume and Z.G. Vranesic, Reusable Motion Synthesis Using State-Space Controllers, Proceedings of SIGGRAPH '90, In Computer Graphics Proceedings, ACM SIGGRAPH, 1990, 225-234) によって紹介された状態空間アプローチを基礎とするだけでなく、応答フィードバックの適用をも考慮している。

## 【0050】

また、BrotmanならびにNetravali (L. Brotman and A. Netravali, Motion interpolation by optimal control., Proceedings of Siggraph 88, Aug. 1988, 309-315) によって紹介された線形最適制御のフレームワークの下で、割り当てられている各個体の役割の交換を機会を見て実施する役割交換（ロールスワップ）をも含めた、複数の個体の同時制御を行う。

## 【 0 0 5 1 】

システムの理論的な観点から見れば、本発明は、時間サンプリングされた連続部分と離散的事象部分とが結合され関連づけられたハイブリッド的な制御である。

## 【 0 0 5 2 】

## (A-4-1) ハイブリッド・システムおよびハイブリッド制御

より詳細に述べれば、本システムはいわゆるスイッチ・システム (Switched System) であり、固有の役割割り当て（ロール・アサインメント）のそれぞれに対応して設定される連続的な時間サブシステムの群と、それらの間のスイッチング（役割交換）を協調化する規則として見ることができる。このような学際的なハイブリッド・システムの分野は、制御とコンピュータ・サイエンスの接点上にあり、自動車産業、電力、航空およびトラフィック制御にも応用が広がっている (Special issue on hybrid control systems, IEEE Control Systems Magazine, 19(4), August 1999)。そのテーマは、衝突、交通等を示すアニメーションに関する一般的な関心といったものになる。

## 【 0 0 5 3 】

## (A-4-2) 状態空間軌道の協調化

特定のレイアウトに従ってそれ自体の形態を整えさせるべく群集を制御することは、フィードバック制御問題としてとらえることができる。群集動特性は、条件反射的行動ならびに相互作用（例：集団本能）はもとより、多くの相互に関係付けられた事象（例：機械、筋肉およびモータの制御）を包含する。このシステムは、一般に、その状態変数間の結合を伴う非線形写像  $f$  になる。本実施形態では、対象となる群集全体を動的システムとみなして定式化し、これを群集アニメーションへ適用しようとするものである。

【0054】

本実施形態の定式化において協調化される群集の動きとは、数学的にみると、所定の評価条件または以下の数3に示す拘束を伴う評価指数 $J(\{U_{n0} \dots U_{\infty}\}, \{X_{n0} \dots X_{\infty}\})$ を最小化するような許容制御集合 $\{U_{n0} \dots U_{\infty}\}$ を見つけ出すことに帰結する。

【0055】

【数3】

数3

$$\forall n \in [n_0 \dots \infty]: X_{n+1} = f(X_n, U_n) \quad \dots\dots (\text{数3})$$

【0056】

ここで無限遠は、実際の整定時間（例：状態変数が基準の $\pm 5\%$ に安定するまでの時間）は、制御レベルを増加させることにより任意に小さくできるという知識に基づく一般性を考慮したものである。この非線形最適化問題では、軌道の処理および入力作業が時間間隔 $[1 \dots \infty]$ にわたって必要となる。

【0057】

対話型アニメーションに適用する場合には、サーチをグローバルに実行することは可能ではなく、各時間ステップにおいて操作作業が必要になる。このため、最適フィードバックの問題としてこの最適化問題を書き直す、閉じた形式の制御規則： $U_n = g(X_n)$ が必要となり、それにおいては $g$ を非線形写像とすることができる。

【0058】

非線形制御の議論（J. Slotine and W. Li. Applied Nonlinear Control. Prentice Hall 1991. 461 pages: ファジーおよびニューラル制御を含む）に入る前に、線形設計に基づいて非線形に関する考え方を統一しておくことが有用と考えられる。このアプローチは、当業者には周知の手段であり、確実な理論的基礎を有する。例えば、スイッチされる線形モデルの群を考慮したゲイン・スケジューリングについてはD.A. Lawrence and W.J. Rugh. "Gain Scheduling Linear Dynamic Controllers for a Nonlinear Plant." Automatica, 31(3). 1995) Pp 381-3

90) に、非線形性を重合された外乱に同化させるロバスト制御についてはK. Zhu. *Essentials of Robust Control*. Prentice Hall International. 1998にその一例が開示されている。

【0059】

これは、アニメーションの分野では現実的な選択である。すなわち、仮想世界においては、動的モデルが良好にふるまうように、それを手作業で作り上げることが正当なのである。興味深いことは、群集形成の数学的理論を提案した2人の物理学者、TonerおよびTu (J. Toner, Y. Tu. *Flocks, herds, and schools: A quantitative theory of flocking*. *Physical Review Letters*. Vol. 58. 1999) が、類似した2段階アプローチを拠り所としていることであり、線形近似から開始し、その後、非線形性を考慮に入れている。非線形性の抽出ならびにその個別の取り扱いは、問題を線形フィードバック制御理論の範囲に引き戻す。このため、ここでは自然のシステムの動特性がマトリクスAおよびBのセットとして次のように与えられると仮定する。

【0060】

【数4】

数4

$$X_{n+1} = AX_n + BU_n \quad \dots\dots (\text{数4})$$

【0061】

ここでマトリクスAは、次に示す構成となる。なお、マトリクスBについても同様に考えるものとする。

【0062】

【数5】

## 数5

$$A = \left[ \begin{array}{cccccccccccc} [E_1] & & & & & & & & & & & \\ & 0 & & 0 & & & & & & & & \\ & & [E_2] & & & & & & & & & \\ & & & & & & & & & & & \\ & & 0 & & 0 & & [E_n] & & & & & \\ \hline & & & & & & & & & & & \end{array} \right] \left. \vphantom{\begin{matrix} A \\ A' \end{matrix}} \right\} Mn_e$$

$$A' = \left[ \begin{array}{cccccccccccc} [E_1] & & & & & & & & & & & \\ & 0 & & & & & & & & & & \\ & & [E_2] & & & & & & & & & \\ & & & [C_{ij}] & & & & & & & & \\ & & & & 0 & & & & & & & \\ & & & & & & & & & & [E_n] \end{array} \right]$$

..... (数5)

【0063】

マトリクスAの対角線上に現れる次元 $n_e$ の正方サブマトリクス $E_i$ は、個別の個体の動特性を表す。一方、対角線から外れた項 $C_{ij}$ は、集団本能等の個体間の「自然的」結合を考慮した項として使用することができる。このような条件反射的行動は回路化 (hardwired) されたものであり、動特性の低いレベルに埋め込まれていることを示唆している。

【0064】

同様な態様において、マトリクスB内の項を、例えばサブグループ間で共通の動機を共有するといった各種の目的のため、一度にいくつかの個体に影響を与える単一の個体に対して発行されたコマンド入力 of 識別に使用することができる。

【0065】

以下の展開は、線形最適制御および線形二次 (LQ) 合成 (G.F. Franklin, J. D. Powell, M. Workman, Digital Control of Dynamic Systems, Addison Wesley, 1998) の基礎を構成する。多変数最適制御規則 $g$ は、フィードバック・システムの状態空間軌道によって次に示す評価指数 (パフォーマンス・インデクス) が最小化されるべくマトリクス・ゲイン $G$ として求められる。

【0066】



【数6】

## 数6

$$J = \frac{1}{2} \sum_{n=n_0}^{\infty} x_n^T Q x_n + u_n^T R u_n \quad \dots \quad (\text{数6})$$

【0067】

Jが二次形式を有することから、ローカルの最小条件が必要になり、それがグローバルな最小値を得るに充分となる。この評価基準は固定された構造を有するが、マトリクスQおよびRにより、選択した状態変数の時間応答と作業の実施レベル（エネルギー）の間を折衷させつつ動的行動を随意調整する手段を、設計者に提供する。

【0068】

線形のケースにおいては、ラグランジュ乗数法を使用する拘束された最小値問題を解くことによって、いわゆるRiccatiの方程式（RE）が導かれる。

【0069】

【数7】

## 数7

$$S_n = A^T [S_{n+1} - S_{n+1} B (R + B^T S_{n+1} B)^{-1} B^T S_{n+1}] A + Q \quad \dots \quad (\text{数7})$$

【0070】

REを解くためには、エンドポイントから時間を逆行してこの式を適用する必要があり、その結果、時間的に変化する制御規則が得られる（G.F. Franklin, J. D. Powell, M. Workman, Digital Control of Dynamic Systems, Addison Wasley, 1998）。さいわい、この時間的に変化する制御規則は、迅速に安定することが知られており、nを $\infty$ に向かわせることにより、一定の規則によって都合よく近似され、それにおいて、定常状態バージョンのRE、すなわち次に示す代数的Riccatiの方程式（ARE）を考察すればよいことになる。

【0071】

【数8】

数8

$$S_{\infty} = A^T [S_{\infty} - S_{\infty} B (R + B^T S_{\infty} B)^{-1} B^T S_{\infty}] A + Q \quad \dots\dots (数8)$$

【0072】

上記の方程式に対して閉じた形の解を得ることは、非常にシンプルな場合を除けば一般に不可能であり、この段階においては数値解析アプローチが適用される。後述するセクション（A-8）では、例えば、多くのCADパッケージで使用されている制御システム設計に関する標準処理である固有値分解に基づく手順の概要を示した。 $S(\infty)$  が求めれば、最適フィードバック規則が次に示す形になる。

【0073】

【数9】

数9

$$G = [R + B^T S_{\infty} B]^{-1} B^T S_{\infty} A \quad \dots\dots (数9)$$

【0074】

制御ゲインGは完全なマトリクス、すなわち個体間の結合を考慮に入れることによって協調化を実行する多変数コントローラであり、群集レベルの評価基準を最小化する。これに対して対角またはブロック対角マトリクスは、個体を互いに独立に制御することになる。

【0075】

（A-4-3）離散的事象に対する協調化された応答

上述した状況は、初期役割割り当ての有効性が所定レイアウトの間持続すること、すなわち $n, n=0$ を仮定している。対話型ゲームでよく見られる時間的に変化する環境においては、この種の安定した状況は現実性がない。群集の協調化を効果的なものとするためには、各種の事象および要因の発生を補償するための個体

間の役割（ターゲット）交換を、機会があるたびに実施することが必要となる。  
ここで、役割交換が実施される機会とは、例えば以下の事項を含むが、それに限定されるものではない。

【0076】

（イ）非線形ダイナミックスと線形仮定の間の矛盾によるランタイム・パフォーマンスの低下。

【0077】

（ロ）オンザフライでレイアウトの強制的再編成が必要となる、群集への個体の追加または群集からの個体の削除。

【0078】

（ハ）時間的に変化する環境において一般的な衝突およびその他のモデリングされていない不確定性等の離散的事象。

【0079】

また、上記機会の他に、ユーザやシナリオによって新たな群集の形成が指示された場合、個体数の変化があった場合、あるいは、個別の個体運動に影響するような障害や衝突があった場合などに、役割交換を実施する構成としても良い。

【0080】

また、実際のアニメーションに適用する場合にはフレーム毎に各個体の状態あるいは位置を決定することが必要であるが、役割の割り当てについては複数のフレーム間で維持し、役割交換の必要性が非常に高い場合にのみ役割交換が実施されるように、その実施のための条件を厳密に限定しておく構成としても良い。さらに、このような構成においては、役割交換の実施をうながす事象間の期間、K個の役割交換候補の評価や比較を禁止するか、あるいは、Kを小さい数に設定する構成としても良い。

【0081】

役割交換の効果を図4を用いて説明する。図4の例は、3つの個体を含む群集の状態空間における軌道を示すもので、ターゲットレイアウト410が予め設定されている初期状態の状態空間401において事象が発生し、各個体の役割交換が実施された場合には状態空間403へ変化し、役割交換が行われなかった場合

には初期状態と同一の状態空間402となる。

【0082】

役割割り当ては、状況のスナップショットから達成される。これは、動的システムをターゲットとなる $x_n$ ・ $x_{ref}$ の状態へ駆動するコストが、各時間ステップにおいて次のように評価され得るとする、最適線形制御理論における注目すべき結果から可能になる。

【0083】

【数10】

数10

$$J = [X_n - \pi_n \cdot X_{ref}]^T S_{\infty} [X_n - \pi_n \cdot X_{ref}] \dots\dots (\text{数10})$$

【0084】

役割交換、すなわち個体とターゲットの間の択一的全単写(k)/k=1...N!は、このようにそれぞれのオプションがもたらす評価ゲインを数値的に評価することによって、指定されたターゲットレイアウトに向かう収束をどの程度それが促進するか、という点において評価され、また比較され得る。このポイントを図5に示す。

【0085】

図5の例においては、個体がターゲットに到達する場合の容易さに応じた個体のランク付けが、積分コスト $J_i = [x_n(i) - x_{ref}(i)]^T Q [x_n(i) - x_{ref}(i)] + u_n(i)^T R u_n(i)$ の評価に基づいて行われる。ここでは、アニメーションの各フレームについて、 $J_i = [x_n(i) - x_{ref}(i)]^T S(\infty) [x_n(i) - x_{ref}(i)]$ としてこれを近似する。 $S(\infty)$ をアイデンティティ・マトリクスに置き換えれば、ユークリッド距離まで低減される。しかし、距離的に近いことがターゲットに到達しやすいことを示唆していない。例えば、魚4、5は図中に示すターゲットに近いが、横方向に動かなければならない。なお、 $x_n$ の更新がいくぶん近視眼的であり、最良オプションを直ちに取り込んでいることについても注意が必要である。

【0086】

(A-5) アルゴリズム

ランタイム中の協調化を実現するための、本願発明者らによるオリジナルのアルゴリズムの一例を図6に示す。本例のアルゴリズムは、応答性が高くリアルタイムにも適用可能である。加えて、設計段階においては、ある種のオフライン・アルゴリズムによって、LQ問題の演算に係わる標準手順を使用し、動的システムの特徴および評価要件から最適フィードバック規則を演算している。これについては後述するセクション (A-8) において論じることにする。

## 【0087】

図6に示す本例のアルゴリズムは、各時間ステップごとに適用されるものであり、たとえば、多体問題 (N-body) シミュレーションにおいて使用されるクラスタ化を含めた各種の方法、またはケース固有の特性に合わせた方法により、演算効率を向上させることが可能である。また、マトリクス表現が使用されているが、場合によってはそれらが非効率的となることもある。

## 【0088】

役割割り当てにおける階乗の複雑性から、役割交換を一部のサブグループに対してだけに制限するという手段がない限り、上記アルゴリズムをスケールアップすることはできない。

## 【0089】

要は、全体的パフォーマンス・インデクス J に大きな影響を及ぼす、パフォーマンスがもっとも低い K 個の個体 (worst performers) を追跡すること、およびそれらの間で行われる役割交換の機会を見つけることにより、 $K < N$  あるいは  $K \ll N$  の場合、演算負荷を  $N!$  から  $K!$  に引き下げるというものである。一般に、リアルタイムで演算をする場合、K は 6 程度の小さい値になる。例えば、 $K=7$ 、 $N=100$  等と設定することができる。N の値が小さいときは、初期ソーティング段階がスキップされ、対応するオーバーヘッドが省略される。

## 【0090】

(A-5-1) 独立した個体ダイナミックスに関する変形

個体間の結合が無視できるとき、各個体 (j) に個別の最適コントローラ (LQ 合成により取得可能) が使用され、それぞれの全体的なパフォーマンスに対する寄与は、 $J(j) = [x_n^j - ({}_n X_{ref})^j]^T S^{entity} [x_n^j - ({}_n X_{ref})^j]$  となり、ここで  $({}_n X_{ref})^j$

は、現在の基準ベクトル $x_n$ ・ $x_{ref}$ のJ番目の座標を表す。なお、役割割り当ては $x_n$ 、レイアウトは $x_{ref}$ のままである。絶対コストではなく微分値を比較し、演算を因数分解すると、Jの複雑性が $O(N^2)$ から $O(N)$ に低減される。

【0091】

(A-5-2) 収束解析

制御理論は動的行動を評価するためのツールを含み、指定したレイアウトが守られているかをチェックする上でそれが役立つ。基礎となっている動特性が線形であれば、LQ制御の本質的安定特性から結果的に収束の形式的証明がもたらされる (G.F. Franklin, J. D. Powell, M. Workman. Digital Control of Dynamic Systems. Addison Wesley. 1998)。リャプノフ法 (J. La Salle, J., and S. Lefschetz, Stability by Liapunov's direct method. Academic Press, New York, 1961) によれば、リャプノフ関数 $V(x_n)$ が次の条件を満たす場合にシステムはグローバルに安定であるとなる。

【0092】

1.  $V(x_n)$ は連続かつ正である。

【0093】

2.  $V(x_n)$ は時間とともに確実に減少する。

【0094】

3. 次を満たす1つの関数 $V(x_n)$ が存在する：

- $0 < (||x_n||) < V(x_n)$
- $||x_n||$ が $\infty$ に近づくに従って $\lim (||x_n||) = \infty$ となる。

【0095】

LQ問題の安定性については立証されていることから (G.F. Franklin, J. D. Powell, M. Workman. Digital Control of Dynamic Systems. Addison Wesley. 1998)、上記条件1、3を満たすリャプノフ関数 $V(x_n) = x_n^T S(\infty) x_n$ を選択する。

【0096】

【数11】

## 数11

$$\begin{aligned}
 \Delta V &= V(X_{n+1}) - V(X_n) \\
 &= X_{n+1}^T S_{\infty} X_{n+1} - X_n^T S_{\infty} X_n \\
 &= X_n^T [A - BG]^T S_{\infty} [A - BG] X_n - X_n^T S_{\infty} X_n \quad \dots\dots (数11) \\
 & \quad [0097]
 \end{aligned}$$

ここで、 $S(\infty) = A^T [S(\infty) - S_{n+1} B (R + B^T S_{n+1} B)^{-1} B^T S_{n+1}] A + Q$ であるため、 $V = -X_n^T [Q + G^T R G] X_n$ となる。つまり、 $[Q + G^T R G]$ が正であり有限であることから $V < 0$ である。このことは、安定性、すなわち役割割り当てが固定されている場合、指定レイアウトに向かって収束することを保証する。考察しているケースにおいては、役割交換（順列 $_n$ ）が更なる負担減少の機会を提供していることから、収束を加速している。

【0098】

【数12】

## 数12

$$\begin{aligned}
 V(\pi_n(X_{n+1})) < V(X_{n+1}) &\Rightarrow V(\pi_n(X_{n+1})) - V(X_{n+1}) < 0 \quad \dots\dots (数12) \\
 & \quad [0099]
 \end{aligned}$$

また、上述の式は、役割割り当ての時間シーケンス $\{0, \dots, n, n+1, \dots, \infty\}$ を最適化することにより、ゲインをさらに向上させることが可能であることを示唆している。ここではアプリケーション領域を考慮し、最良の瞬時選択（最適より低い、近視眼的見解）を採用し、さらにしきい値 $_{min}$ を用いて複合的な切り替えを防止している（安定性に対する切り替え規則の影響を扱った最近の議論が（D. Liberzon and A. Morse, Basic Problems in Stability and Design of Switched Systems, IEEE Control Systems Magazine, Oct. 1999, 59-70）にあるので参照されたい）。

【0100】

非線形ダイナミックスについては、リャプノフ法が適用可能であるが、実行は

複雑であり、コンピュータ・シミュレーションを行ってアルゴリズムがトラップされないかどうかをチェックする必要がある。図 7 に、評価指数 (Performance index) を示すグラフ (図 7 (a)) と、ローカルな相互作用の数を示すグラフ (図 7 (b)) とを示す。ローカル相互作用の数を示すグラフにおいて、白い棒グラフは衝突の数を、黒い棒グラフは役割交換の数を示す。また、両グラフの横軸は時間変化に対応するフレーム数を示す。両グラフは、フレーム数および役割交換の実施回数の増加に伴い、衝突回数および評価指数が減少することを示している。

#### 【0101】

##### (A-5-3) リアルタイム・パフォーマンス

本発明を適用したアルゴリズム (図 6 および図 8) を、フレーム・レートを 50 Hz、ピーク演算を数 GFLOPS/秒として、ゲームに対する演算の負荷および安定性を評価した (図 9 参照)。使用する装置として株式会社ソニーコンピュータエンターテインメントの PlayStation2 を用いた。動特性および協調化処理に使用される CPU 時間はごくわずか (1%) であると仮定し、さらに役割交換の対象となる個体数については  $K=6$  に制限する。協調化および動特性は、個体数  $N$  が小さい場合、同じ程度の演算負荷となるが、 $N$  が大きくなると前者が圧倒的となる。

#### 【0102】

図 8 に示すアルゴリズム A2 は、ブロック対角システムについて最適化されたバージョンのアルゴリズムの一例である。図 8 のアルゴリズム A2 は、上記図 6 に示したアルゴリズム A1 より優れた線形的特性を備えている。これは、コア・マトリクス  $S(\infty)$  A、B、および G に関して、 $N$  の増加とともに線形に増加するか、2 次関数的に増加するかの違いによるものである。

#### 【0103】

なお、上記アルゴリズム A2 の協調化処理における離散的部分を、オペレーションリサーチ (Operation Research) の技術分野に見られる標準的な割り当て問題 (Assignment Problem) として扱う構成としても良い。例えば、 $K$  が大きくなった場合には、上述したような順列表を用いた役割交換処理の代わりに、いわゆるトランスポートーション・シンプレックス (Transportation simplex) と呼ばれ



る周知のシンプレックス法（線形プログラミング）のストリームラインバージョンや、オペレーションリサーチ分野での割り当て問題専用を用意された周知のアルゴリズムを用いることができる。

## 【0104】

## （A-6）実用化について

本発明の理論を実用化するために、モデリングから、シミュレーション、およびコンテンツ・オーサリング・ツール、さらにはランタイム・エンジンにわたる多面的な開発がなされた。開発されたプロトタイプは、Matlab、MayaおよびPlay Station2のランタイム・コードに基づいている。

## 【0105】

## （A-6-1）非線形性についての考察

協調化の効率是非線形性、つまり手作業で作り上げられていた動的モデルを巧みに操り、線形フィードバックを良好に機能させられるかにかかっている。これは、グローバルな最適性は線形動特性に関してだけ保証されているためである。このようなタスクの自動化は容易でなく、動特性に関する専門知識を必要とする。いくつかの実用的なガイドラインをここに示す。

## 【0106】

## （A-6-1. 1）非線形性が無視した場合

一例として50の個体（ミツバチ）からなる群集のアニメーションについて説明する。本例によるミツバチの群れは、集団的行動（線形引力）を示す一方で、接近すると互いを嫌う（非線形性、衝突に関するニュートンの法則）という性質を備えている。このミツバチの群れについて生成したアニメーションからの一場面を図10に示す。

## 【0107】

図10において、50匹のミツバチが光の下に集まり、その周縁部で形をなしている。これにおける動的モデルは、他のケースにおけるような機械的なモデルではないが、この動特性の採用により、個体の展開が加速することを抑制し、ある種の組織的な集団行動がモデル化された。

## 【0108】

システムの方程式は $X_{n+1}=AX_n+BU_n+(X_n)$ であり、一例として図11に概念的に示されているようなマトリクスが上記アルゴリズムA1での演算に必要となる。ここで、マトリクスGは個体に関する入力を、マトリクスSはコスト（評価指数）、例えば単純な距離などを求めるために使用される。本図では、マトリクスの非ゼロ成分は黒く、ゼロ成分は白地の状態で示されている。50匹のミツバチのように大きい群集については、多変数フィードバックの演算負荷がシミュレーションのそれに勝り、そのことは図11のマトリクスAおよびBのサイズと、GおよびS（ $\infty$ ）のサイズの比較からも示される。

#### 【0109】

集団的行動（定常的外乱）の補償には、フィードフォワード・ゲイン（G.F. Franklin, J. D. Powell, M. Workman. Digital Control of Dynamic Systems. Addison Wesley. 1998）を使用する。LQ合成に基づき、まずを無視してA、B、QおよびRから最適フィードバックを設計し、続いてシミュレーションによってその効果を評価する。

#### 【0110】

上記図7に図示したように、当初、群れ自体が「崩壊」するが、フレーム数=21でレイアウトが適用されると、徐々に群れが形成され指定されたとおりの形を作る。本例では、役割交換は1フレーム当たり6個体に制限しているが、役割交換に時間がかかるため、実際にはさらに多くの個体が関係する。衝突があるにもかかわらず、群れは指定どおりの形態を構成する。

#### 【0111】

（A-6-1. 2）演繹的に非線形性を回避する場合

第2の例では、非線形動特性を備えた航空機を考慮する。この問題に取り組むため、状態空間におけるある種の動作点回りの動的行動を線形近似するシステムのヤコビアンを考慮することによって、強制的に線形性を出現させる。航空機は編隊として展開し、かつ同一の概略速度を維持するものと仮定し、システムのヤコビアンを抽出する。

#### 【0112】

【数 13】

## 数13

$$\delta X_{n+1} = (\partial f / \partial X)_0 \delta X_n + (\partial f / \partial U)_0 \delta U_n = A \delta X_n + B \delta U_n \quad \cdots \cdots \text{ (数 13 )}$$

【0113】

図12 (a) は本例における評価関数 (最適コスト) のフレーム数に対する変化を示すグラフであり、図12 (b) は本例の航空機編隊に含まれる6機の航空機に対して割り当てられる状態空間内での役割の変化を示すタイムチャートである。本例においては、航空機が編隊飛行し、システムのヤコビアンが抽出される周辺で所定の動作点が提供されると仮定して、制御規則を算出している。また、フレーム100および200において、レイアウトの変化が起こり、航空機間での役割交換をトリガしている。

【0114】

図12に示されるように、本例のように非線形性が控えめである場合、パフォーマンス・インデックスの非定常的な減少を示す。役割交換のしきい値は、フリッカおよび散発的な役割交換を回避するため、約30%まで下げられた。

【0115】

(A-6-1. 3) 非線形性の処理が必要な場合

第3の例は、(I) 尾びれの推進力、(II) 流体力学システムの状態変数における非線形結合、および(III) 相互回避の条件反射的行動 (有限状態マシンに係わる) に起因する複数の非線形性を備えた、6匹の魚により構成される群れに関するものである。

【0116】

流れに抗して泳ぐことによって動作点が提供され、その周辺でシステムのヤコビアンが抽出される。インパルス列として加えられ、クロック・ジェネレータの逆相によってトリガされる尾びれの動き ( $F^+$ ,  $F^-$ ) は、Nougaretら (JI Nougaret, B. Arnaldi and F. Multon, Coarse to fine design of feedback controllers for dynamic locomotion, Visual Computer, 4(10), 1997) から示唆されるように、駆動サイクルにわたる時間平均を通じて制御される。

## 【0117】

重要な非線形性のため、状態空間における魚の群れの軌道は、図13に示すように複雑になり、アルゴリズムの動きは、協調化された魚の群れの動きに関するわれわれの予測をはるかにしのぐものとなる。

## 【0118】

図13(a)は本例における評価指数(Performance index)のフレーム数に対する変化を示すグラフである。また、図13(b)は本例の群れに含まれる6匹の魚に対して割り当てられる状態空間内での役割の変化を示すタイムチャートで、各ラインは各魚を表し、各垂直座標は各ターゲットを表す。本例のように強い非線形性が存在する場合は、パフォーマンス・インデクスの減少が不規則になる。例えば、フレーム300においては、レイアウトの変化によって役割交換がトリガされている。フレーム200近傍では、自然発生的な役割交換が行われている。

## 【0119】

一方、内在する動特性がこの種の動きを排除するという理由から、あるいはグローバルなサーチが避けられないことから、目標とする指定レイアウトに到達し得ないことも多々ある。このため、アルゴリズムのパフォーマンスを調整するためには、膨大な数値シミュレーションが必要になる。

## 【0120】

【数 1 4】

数 1 4

$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} v_i(n+1) \\ v_j(n+1) \\ \omega(n+1) \\ x(n+1) \\ y(n+1) \\ \psi(n+1) \end{bmatrix} &= f[x(n), u(n)] = \begin{bmatrix} 0.7071 & 0.7071 \\ 0.7071 & -0.7071 \\ 7.7000 & -7.7000 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F^+ \\ F^- \end{bmatrix} \\
 + \begin{bmatrix} 0.9720 & +0.4\omega(n) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -0.4\omega(n) & 0.9640 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.72 & 0 & 0 & 0 \\ 0.4\cos\psi(n) & -0.4\sin\psi(n) & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0.4\sin\psi(n) & 0.4\cos\psi(n) & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0.4 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_i(n) \\ v_j(n) \\ \omega(n) \\ x(n) \\ y(n) \\ \psi(n) \end{bmatrix} \\
 1 & 4 \quad 4 \quad 4 \quad 4 \quad 4 \quad 4 \quad 4 \quad 4 \quad 4 \quad 2 \quad 4 \quad 4 \quad 4 \quad 4 \quad 4 \quad 4 \quad 4 \quad 4 \quad 4 \quad 3 \\
 & \text{Non-linear dynamics(time varying matrix)} \\
 & \dots\dots(\text{数 1 4})
 \end{aligned}$$

【0 1 2 1】

【数15】

数15

$$Q = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2.5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1.5 \end{bmatrix} \quad R = \begin{bmatrix} 0.99 & 0 \\ 0 & 0.99 \end{bmatrix}$$

.....(数15)

【0122】

【数16】

数16

$$A = \partial f / \partial x|_0 = \begin{bmatrix} 0.972 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.964 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.720 & 0 & 0 & 0 \\ 0.4 & 0 & 0 & 1.000 & 0 & 0 \\ 0 & 0.4 & 0 & 0 & 1.000 & 0 \\ 0 & 0 & 0.4 & 0 & 0 & 1.000 \end{bmatrix} \quad B = \partial f / \partial u|_0 = \begin{bmatrix} 0.7071 & 0.7071 \\ 0.7071 & -0.7071 \\ 7.7000 & -7.7000 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

.....(数16)

【0123】

【数17】

数17

$$G = \begin{bmatrix} 0.1503 & 0.2324 & 0.0293 & 0.4516 & 0.4902 & 0.4118 \\ 0.1503 & -0.2324 & -0.0293 & 0.4516 & -0.4902 & -0.4118 \end{bmatrix}$$

.....(数17)

【0124】

【数18】

数18

$$S_{\infty} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 4.1197 & -0.3783 & 0 & 3.7078 & -2.6483 \\ 0 & -0.3783 & 0.0347 & 0 & -0.3405 & 0.2432 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 3.7078 & -0.3405 & 0 & 3.3370 & -2.3834 \\ 0 & -2.6483 & 0.2432 & 0 & -2.3834 & 1.7024 \end{bmatrix}$$

【0125】

(A-6-2) 制限および将来の課題

上述したアルゴリズム及び適用例は、外因性外乱の存在下において軌道を安定させつつ動的群集を効率的に制御するための一般的な方法がないという、現時点におけるこの分野の間隙を埋めるものである。しかしながら、補償されていない非線形性が不用意にシステムに導入されるとこのアプローチが維持されない場合もあることから、ロバスト性というシステムの頑健さにおいて改善を必要とする。

【0126】

たとえば、現在は、相互作用する個体間の（一時的な）結合を伴う動的方程式を追加することによって衝突回避が控えめに考慮されているが、Jは結果として得られるパスが衝突無しのパスであるかどうかと無関係に評価されている。衝突回避規則として線形反発関数を使用すれば、衝突のない最適パスを期待できるが、それによってパフォーマンスが低下する。レイアウトは、シーケンスに従って発行可能であり、それは衝突の可能性を抑えるものとなるが、収束のチェックおよびしきい値パラメータ $\min$ の調整に常に数値シミュレーションが必要になる。

【0127】

収束の保証がない場合、潜在する非線形ダイナミックスがレイアウトの実施を拒むことがある。最終的な手段として、非線形最適化アルゴリズムに頼ることよ

って時間間隔上で軌道の処理を試みることも可能であるが、そのアプローチが相互作用レートを排除することから、ハイブリッド・システムならびに高いロバスト性を備えた制御についての理解をさらに深め、状態フィードバックをよりロバスト性の高いものとするのが次の目標となる。衝突回避規則のより良い統合もまた、アルゴリズムのロバスト性を高める上で欠かせない。

【0128】

(A-7) 結論

以上、制御規則の統合を自動化し、行動解析に関する形式上のツールを提供することによって、最適フィードバックの一般的フレームワーク内において、協調された群集の動きの考察してきた。また、連続的な安定化フィードバックを必要とする動特性に取り組んでいる。残念ながら、このようなアプローチは、膨大な動特性に間する専門知識が求められることから、万能なものとは言えない。

【0129】

ゲーム設計技術者をこの種の複雑性から開放するためのワークフロー、ソフトウェア・ツール、およびコンポーネント化の開発は必須である。スイッチシステム概念の活用して、複雑な動特性をシーケンス化あるいは並列化することで演算負荷を低減することができる。最後になるが、意味論上のシーン表現に関するプランニングならびに論証、および巧妙な発見的方法が役割割り当てを向上させるものと考えられる。

【0130】

(A-8) オフライン・アルゴリズム

設計段階において、2つのオフライン・アルゴリズムから得られたマトリクスによって協調化方法がパラメータ表現される。最初のアルゴリズム(図14)は、固有ベクトル分解に基づく多変数最適フィードバックを演算し、ARE(LQ合成における標準アルゴリズム)を解くものである。

【0131】

第2のオフライン・アルゴリズム(図15)は、再帰的に順列 $K!$ を生成し、あらかじめそれを格納しておく。これら演算結果は、シーケンシャルに適用されてランタイム時に役割交換を評価する。 $K=7$ の場合、テーブルのエントリ数は4,



320になる。順列アルゴリズムについては、Grimaldi (R. Grimaldi, Discrete and combinatorial mathematics, Addison-Wasley, NewYork, 1999) に紹介されている。

【0132】

(B) エンターテイメント装置

本発明を適用した制御方法を用いて生成されるアニメーションを使用するエンターテイメント装置の一実施形態を説明する。

【0133】

(B-1) 機能ブロック構成

図16に、本実施形態に係るエンターテイメント装置の主要部分の機能ブロック図を示す。

【0134】

図16において、101はゲームプレイヤーが各種指示を入力するための操作手段であり、操作手段101が入力した操作データは、ゲーム実行手段102に送られる。

【0135】

ゲーム実行手段102は、予め定めたシナリオに従ってゲームを進めていくロール・プレイング・ゲーム実行手段103と、ゲームプレイヤーからの指示あるいはシナリオに従いゲーム中に出現するさまざまな群集や集団の形成や制御（グループレベルの制御）を実施するグループ・アニメーション制御手段104と、画像生成手段105とを備えており、操作手段101から受け取ったゲームプレイヤーの指示と、記憶手段106に記憶されているゲームプログラムやゲーム用データ等に基づいて、ロール・プレイング・ゲームの進行処理を行うと共に、画像生成手段105によって、ゲーム画面として表示すべき画像を生成して表示手段107に表示する処理を行う。

【0136】

なお、ゲーム実行手段102は、CPU (Central Processing Unit), GPU (Graphic Processing Unit) 等のハードウェアで実現することができ、記憶手段106は、CD-ROM (Compact Disk-Read Only Memory), ハードディ

スク、メモリ、DVD (Digital Video Disk) 等のハードウェアで実現することができる。

【0137】

また、表示手段107は、CRT (Cathode Ray Tube) 等を用いたモニタやテレビジョン等で実現することができ、家庭用や業務用等のゲーム機の形態に応じて、ゲーム機本体と一体化されたもの、または、本体と分離されたもののどちらであってもよい。

【0138】

本実施形態では、本発明の群集アニメーションの制御方法をロール・プレイング・ゲームに適用する例を挙げたが、本発明が適用できるのは上記例に限定されるものではない。例えば、複数の個体からなる群集であって、各個体の運動特性が擬似的に表すことができるものであれば、例えば、人間や機械などの集団がさまざまな形態を形成しつつ移動する戦争シミュレーション・ゲームや競争シミュレーション・ゲーム、あるいは、群れや集団を形づくりあるいは移動する生物をシミュレーションした人工生物体を含むゲームにも同様に適用することができる。

【0139】

(B-2) ハードウェア構成

本実施形態を実現できるエンターテイメント装置の概観の一例、および、概略的なハードウェア構成の一例について、図17および図18を用いて説明しておく。

【0140】

本エンターテイメント装置の概観は、例えば、図17に示すように構成されている。エンターテイメント装置1は、CD-ROM等の光ディスクに記録されているゲームプログラムを読み出して、ゲームプレイヤーの操作に応じて実行するものである。

【0141】

エンターテイメント装置1の本体2は、ゲームプログラムが記録された光ディスクが装着されるディスク装着部3と、ゲームを任意にリセットするためのリセ

ットスイッチ4と、電源スイッチ5と、光ディスクの装着を操作するためのディスク操作スイッチ6と、スロット部7A、7B（本例では、2つ）とを備えて構成されている。

## 【0142】

スロット部7A、7Bには、操作装置（コントローラ）20を接続することができ、また、ゲームデータを記録したり読み出したりすることができるメモリカードを装着することもできる。

## 【0143】

なお、エンターテインメント装置1は、モニタ30およびスピーカ40と接続されるようになっており、接続部分については図示していない。図17では、モニタ30およびスピーカ40として、テレビジョンを用いた例を示している。

## 【0144】

また、エンターテインメント装置1の概略的なハードウェア構成は、例えば、図18に示すようになっており、エンターテインメント装置1は、CPU51およびその周辺装置等からなる制御系50と、フレームバッファ63に描画を行うGPU62等からなるグラフィックシステム60と、楽音・効果音等を発生するSPU（Sound Processing Unit）等からなるサウンドシステム70と、ゲームプログラムが記録されている光ディスクの制御を行う光ディスク制御系80と、ゲームプレイヤからの指示が入力されるコントローラ20からの信号およびゲームの設定等を記憶するメモリカード10からのデータの入出力を制御する通信制御系90とを備えて構成されている。

## 【0145】

図18において、制御系50は、CPU51と、割り込み制御やダイレクト・メモリ・アクセス（DMA）転送の制御等を行う周辺装置制御部52と、RAM（Random Access Memory）からなるメインメモリ53と、メインメモリ53・グラフィックシステム60・サウンドシステム70等の管理を行うオペレーティングシステム（OS）が格納されたROM（Read Only Memory）54とを備えて構成されている。

## 【0146】

CPU51は、電源が投入されると、ROM54に格納されているOSを実行することで、グラフィックシステム60・サウンドシステム70等のエンターテインメント装置1の全体を制御するようになっている。

【0147】

また、CPU51は、OSが実行されると、動作確認等の初期化を行った後、光ディスク制御系80を制御して、光ディスクに記録されているゲームプログラムを実行する。このゲームプログラムの実行により、CPU51は、ゲームプレイからの指示に応じて、グラフィックシステム60・サウンドシステム70等を制御して、画像の表示や楽音・効果音等の発生を制御する。

【0148】

また、図18において、グラフィックシステム60は、座標変換等の処理を行うGTE (Geometry Transfer Engine) 61と、CPU51からの描画指示に従って描画処理を行うGPU62と、GPU62により描画された画像を記憶するフレームバッファ63と、圧縮符号化された画像データを復号する画像デコーダ64とを備えて構成されている。

【0149】

GTE61は、例えば、複数の演算を並列に実行する並列演算機能を備え、CPU51からの演算要求に応じて、座標変換・透視変換・光源計算等の演算を高速に行うことができるようになっている。また、GPU62は、CPU51からの描画命令に従って、フレームバッファ63に対して、ポリゴン等の描画を行う。

【0150】

また、フレームバッファ63は、デュアルポートRAMからなり、GPU62からの描画またはメインメモリ53からの転送と、表示のための読み出しとを、同時に行うことができるようになっている。なお、フレームバッファ63には、ビデオ出力としてモニタ30に出力される表示領域の他に、GPU62がポリゴン等の描画を行う際に参照するカラー・ルックアップ・テーブル (CLUT) が記憶されるCLUT領域と、描画時に座標変換されてGPU62によって描画されるポリゴン等の中に挿入される素材 (テクスチャ) が記憶されるテクスチャ領

域とが設けられている。

【0151】

また、画像デコーダ64は、CPU51からの制御により、メインメモリ53に記憶されている静止画や動画の画像データを復号し、再度メインメモリ53に記憶する。この復号された画像データは、GPU62によって、フレームバッファ63に記憶され、背景画像として使用されることができるようになっている。

【0152】

また、図18において、サウンドシステム70は、CPU51からの指示に従って、楽音・効果音等を発生するSPU71と、SPU71により波形データ等が記憶されるサウンドバッファ72とを備えて構成されている。SPU71によって発生される楽音・効果音等は、スピーカ40に出力される。SPU71は、音声データを復号する機能と、サウンドバッファ72に記憶されている波形データを、そのままもしくは変調してから再生する機能とを有している。

【0153】

また、図18において、光ディスク制御系80は、光ディスクに記録されたゲームプログラムやデータ等を読み出す光ディスク装置81と、ゲームプログラムやデータ等を復号するデコーダ82と、光ディスク装置81の読み出しデータを一時的に格納することにより、光ディスクからの読み出し速度を高速化するためのバッファ83とを備えている。

【0154】

また、図18において、通信制御系90は、バスを介してCPU51との間の通信の制御を行う通信制御部91を備えて構成されており、ゲームプレイヤからの指示を入力するコントローラ20が接続されるコントローラ接続部9と、ゲームの設定データ等を記憶するメモリカード10が接続されるメモリカード挿入部8が、通信制御部91に設けられている。

【0155】

コントローラ接続部9に接続されたコントローラ20は、ゲームプレイヤからの指示を入力するために、複数の指示キーを有し、通信制御部91からの指示に従って、この指示キーの状態を送信する。そして、通信制御部91は、コントロ

ーラ20の指示キーの状態をCPU51に送信する。これにより、ゲームプレイヤーからの指示がCPU51に入力され、CPU51は、実行しているゲームプログラムに基づいて、ゲームプレイヤーからの指示に応じた処理を行う。

【0156】

また、CPU51は、実行されているゲームの設定データ等を記憶する必要があるときに、その記憶すべきデータを通信制御部91に送信し、通信制御部91は、CPU51からのデータを、メモリカード挿入部8のスロットに装着されたメモリカード10に書き込む。

【0157】

以上に、本実施形態を実現できるエンターティメント装置の概観の一例、および、概略的なハードウェア構成の一例を示したが、本実施形態を実現できるエンターティメント装置の例は、本例に限るものではない。また、本実施形態は、エンターティメント装置に限られず、汎用的な情報処理装置で実現することができる。

【0158】

例えば、本発明が適用されるグループ・アニメーション制御を実施する場合には、コントローラ20に特定のグループの形成やその形態を所定の形状とするための指示等、グループレベルの指示を行うための指示キーを、通常の指示キーに加えてさらに設ける構成としても良い。

【0159】

以上、本発明による群集アニメーションの生成方法およびそれを利用してエンターティメント装置について説明したが、本発明は動特性がシミュレーションされた交換可能な複数の個体あるいはオブジェクトからなる群集システムの動きを制御する場合にも用いることができる。

【0160】

例えば、交換可能な複数の個体からなる群集をシミュレーションするシステムの制御において、予め定められた各個体の動特性に基づいて、各個体の状態を時間ステップごとに決定する連続処理手順と、当該群集全体で実現すべき全体状態に関する指示を外部から受け付け、該受け付けた全体状態に応じて各個体に、当

該群集内での役割を割り当てる離散処理手順とを備え、前記離散処理手順によって新たな役割が各個体間に割り当てられた場合、前記処理手順では前記新たに割り当てられた役割に応じて各個体の動的状態を調整する。

【0161】

また、N個（Nは2以上の自然数）の個体からなる群集のシミュレーションにおいて、予め定められた状態空間中の初期配置から目的とする配置へ移動させる場合に、該群集の動きを制御において、

a) 最短距離での移動が行われるように、前記初期配置にある各個体を、前記目的配置中の各個体位置に割り当てる手順、

b) 手順aでの割り当てに従い、前記初期配置にある個体を移動させる手順、

c) 手順bでの移動に際して、前記各個体がそれぞれ割り当てられた前記目的配置に到達するまでの動きについて、予め定められた評価関数の値を算出する手順、

d) 前記評価関数の値が大きいものからK個（KはN以下の自然数）の個体を選択する手順、および

e) 前記選択したK個の個体から得られるK!の組み合わせの中で、前記目的配置への割り当てを組み替える手順を含み、

手順eの後に手順bへ戻り、手順b～手順eの手順を繰り返す構成としてもよい。

【0162】

【発明の効果】

本発明によれば、動的にシミュレーションされた複数の個体からなる群集のアニメーションにおいて、動的制御を可能とするアニメーションの生成方法および装置、およびその方法を用いて生成されたアニメーションを使用するエンターテインメント装置を提供することができる。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明による群集レベルの制御により得られるアニメーションの一例を示す説明図。

【図2】本発明を適用したハイブリッド最適フィードバック制御を実施するシス

テムの一実施形態を示すブロック構成図。

【図3】本発明による群集レベルの制御により得られるアニメーションの一例を示す説明図。

【図4】本発明における役割交換の一例を示すもので、3つの個体を含むグループでの状態空間軌道の変化を示す説明図。

【図5】本発明による役割交換の例を説明するための説明図。

【図6】本発明によるランタイム協調化アルゴリズムの一例を示す説明図。

【図7】

図7(a)：本発明を適用したシステムにおける評価指数 (Performance index) の時間変化 (横軸はフレーム数) を示すグラフ。

図7(b)：本発明を適用したシステムにおけるローカルな相互作用の数の時間変化 (横軸はフレーム数) を示すグラフ。

【図8】ブロック対角システムについて最適化されたバージョンのアルゴリズムの一例を示す説明図。

【図9】本発明を適用したアルゴリズムを用いて、ゲームに対する演算の負荷および安定性を評価した結果を示した説明図。

【図10】本発明を用いて作成されたアニメーション (ミツバチの群れ) の一例からの一場面を示す説明図。

【図11】図10のアニメーションの生成に使用されるマトリクスの一例を示した説明図。

【図12】

図12(a)は、本発明を適用したアニメーションの他の例における評価関数 (最適コスト) のフレーム数に対する変化を示すグラフ。

図12(b)は、図12(a)の例で用いられた航空機編隊に含まれる6機の航空機に対して割り当てられる状態空間内での役割の変化を示すタイムチャート。

【図13】

図13(a)は、本発明を適用したアニメーションの他の例における評価指数 (Performance index) のフレーム数に対する変化を示すグラフ。 図13(b)



）は、図 1 3 （ a ） の例で用いられた 6 匹の魚に対して割り当てられる状態空間内での役割の変化を示すタイムチャート。

【図 1 4】本発明による協調化処理にかかわるパラメータを演算するオフライン・アルゴリズムの一例を示す説明図。

【図 1 5】本発明による協調化処理にかかわるパラメータを演算するオフライン・アルゴリズムの他の例を示す説明図。

【図 1 6】本発明を適用した制御方法を利用したエンターテインメント装置の機能ブロック構成の一例を示すブロック図。

【図 1 7】本発明を適用した制御方法を利用したエンターテインメント装置を備えたシステムのハードウェア構成の一例を示す説明図。

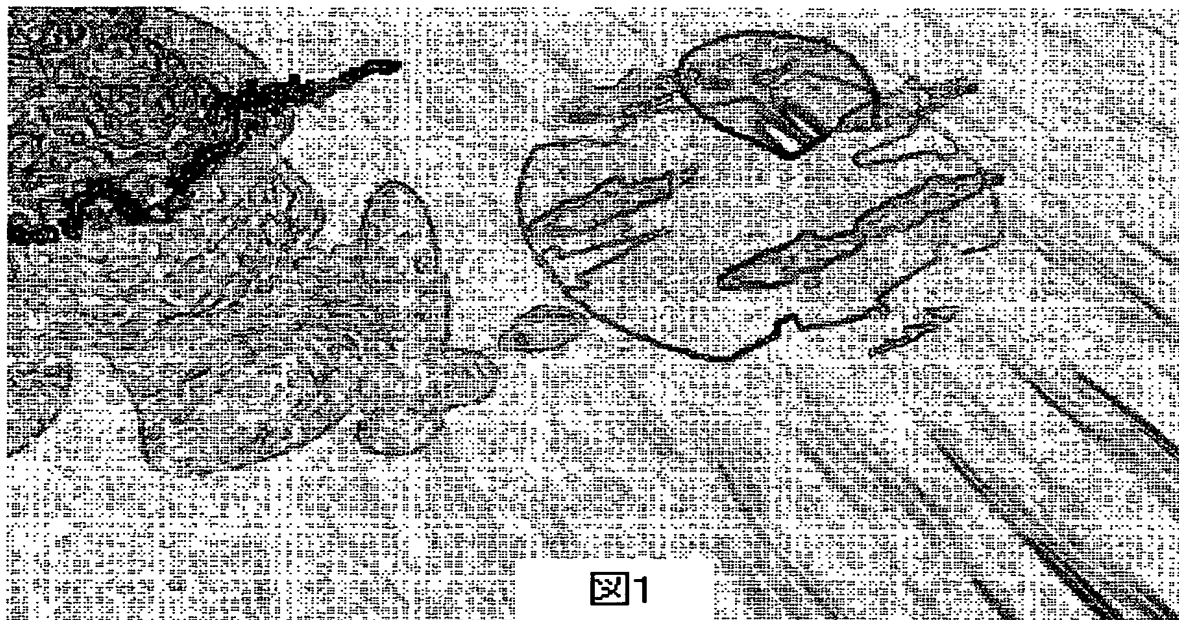
【図 1 8】本発明を適用した制御方法を利用したエンターテインメント装置の回路構成の一例を示すブロック図。

【符号の説明】

2 0 0 …レイアウト、2 0 1 …役割割り当てスイッチボード、2 0 2 …ハイブリッド協調化処理部、2 0 2 a …最適連続制御部、2 0 2 b …最適離散役割割り当て部、2 0 4 …個体状態決定部。

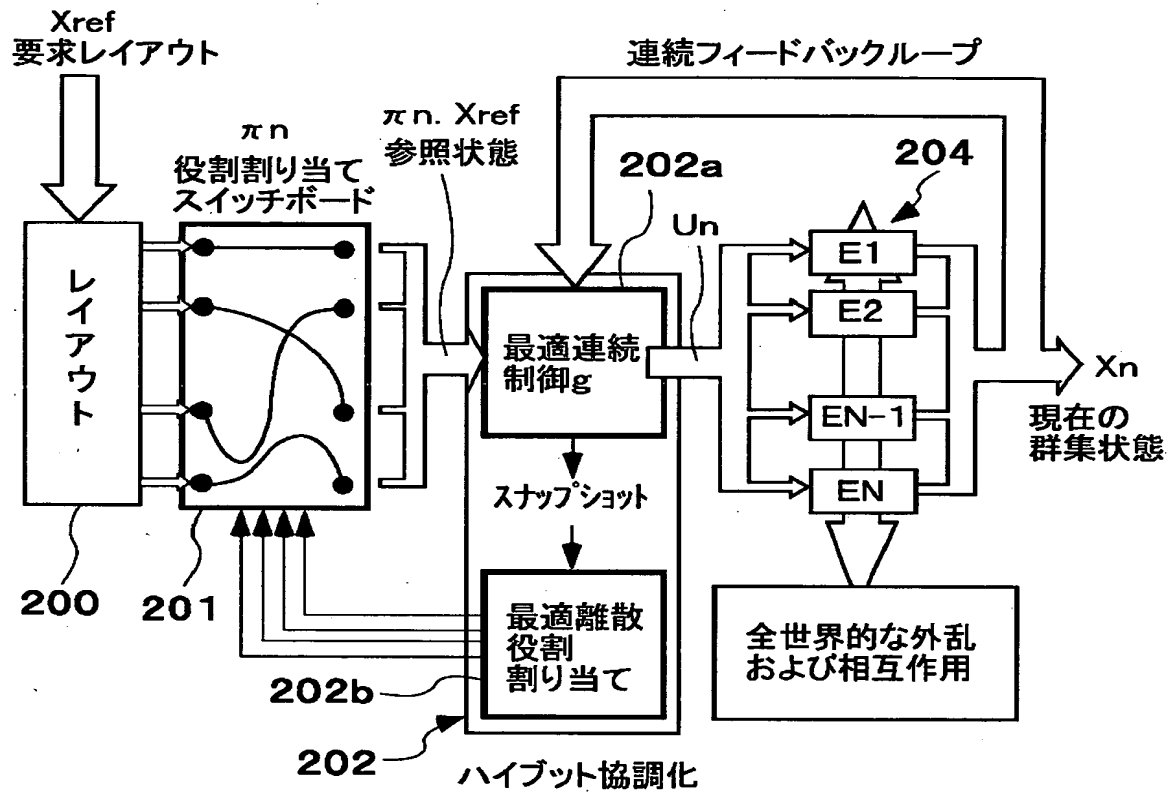
【書類名】 図面

【図1】



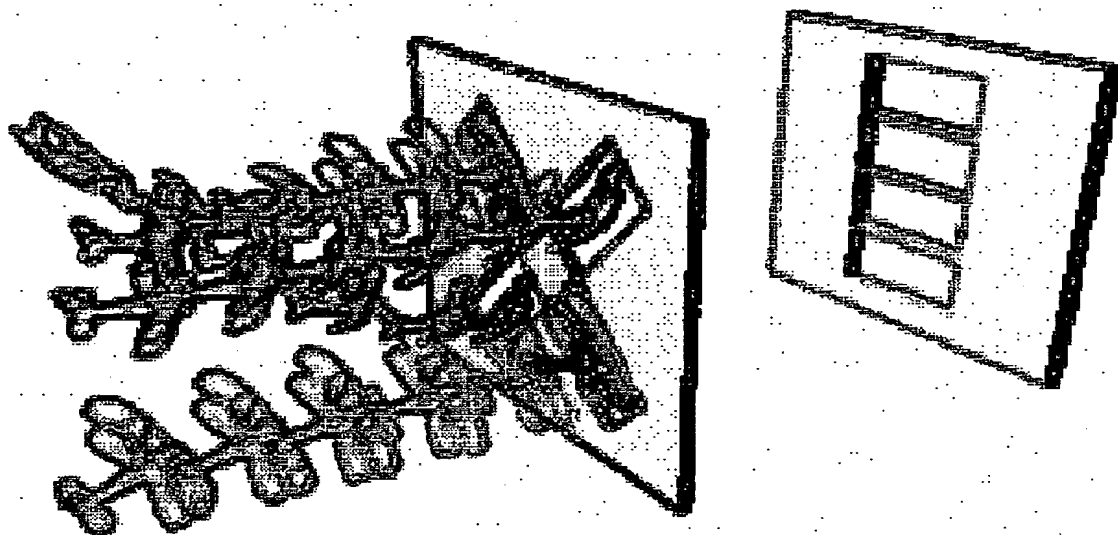
【図 2】

図2

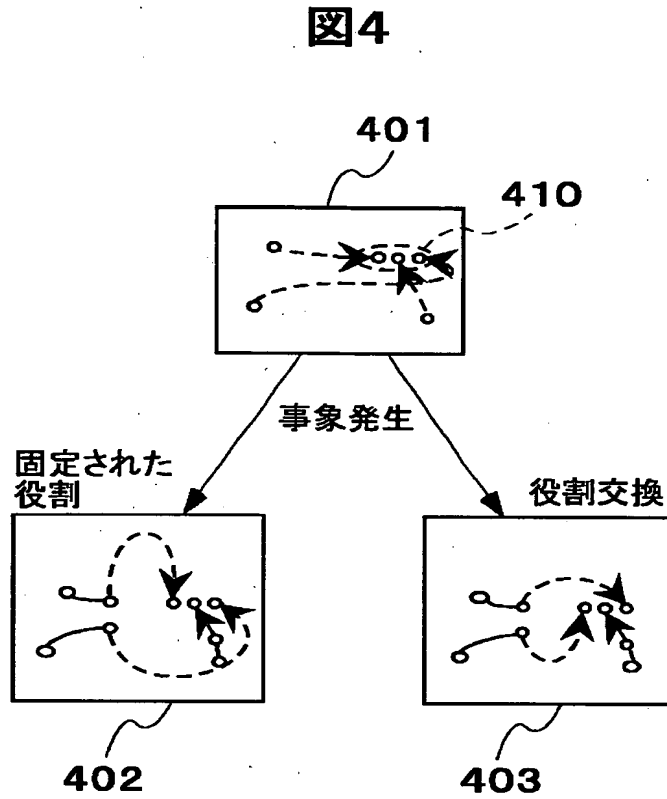


【図3】

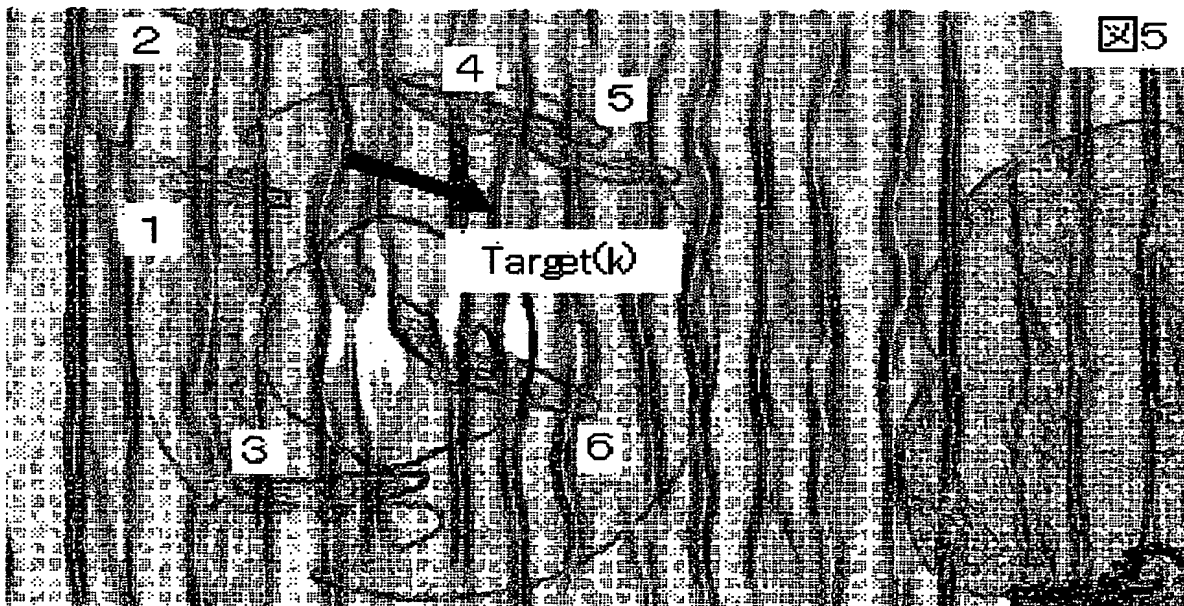
図3



【図4】



【図5】



【図 6】

## 図6

ランタイム協調化アルゴリズム (A1)

連続多変数制御 ( $\pi_n$ によって定義される役割割り当て) を使用

$$1. \quad U_n \leftarrow -G[X_n - \pi_n \cdot X_{ref}]$$

動的シミュレーション・ステップ

$$2. \quad X_{n+1} \leftarrow f(X_n, U_n)$$

$$3. \quad J_\omega \leftarrow (X_n - \pi_n \cdot X_{ref})^T S_\omega (X_n - \pi_n \cdot X_{ref})$$

全体的なコストに対する個体の寄与率に従って個体をソートする

4 For each entity  $j$  do

$$5 \quad X_n^j \leftarrow [X_n^1, X_n^2, \dots, j^{\text{th}} \text{ coordinate of } (\pi_n X_{ref}), \dots, X_n^N]$$

$$6 \quad J_j(n) \leftarrow (X_n^j - \pi_n \cdot X_{ref})^T S_\omega (X_n^j - \pi_n \cdot X_{ref})$$

7 Endfor

8 Sort entities by decreasing  $J_j(n)$

寄与率が低い方から最悪のパフォーマンスを示した $K$ 個の個体を選択し、役割交換の機会を探す

9 For  $K!$  permutations  $\pi(k)$  of  $K$  candidates do

$$10 \quad J_\omega(\pi(k)) \leftarrow (X_n - \pi(k) \cdot X_{ref})^T S_\omega (X_n - \pi(k) \cdot X_{ref})$$

11 if ( $J_\omega^* > |J_\omega(\pi(k)) + \Delta_{min}|$ ) then

$$12 \quad J_\omega^* \leftarrow J_\omega(\pi(k))$$

$$13 \quad k^* \leftarrow k$$

14 endif

15 endfor

役割割り当てスイッチボードを更新する

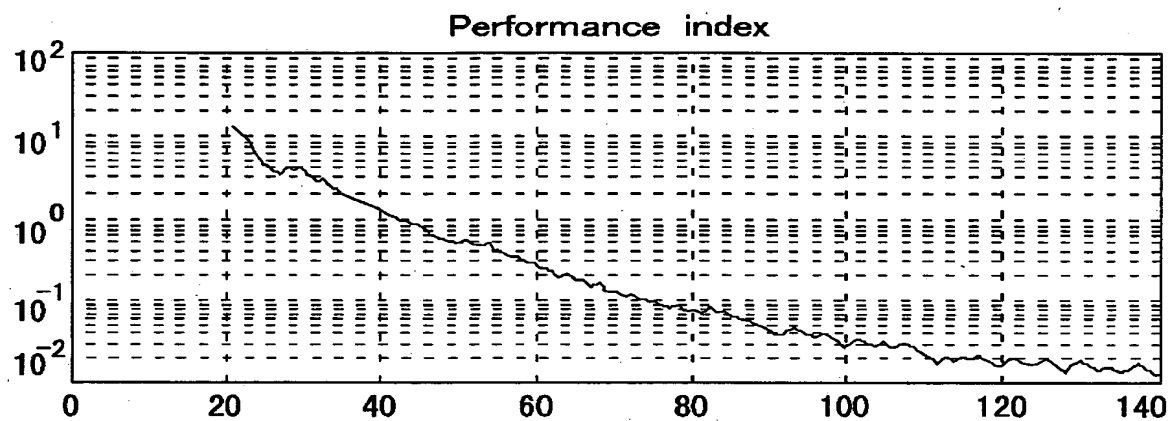
$$16 \quad \pi_{n+1} \leftarrow \pi(k)^*$$

- 
1. フィードフォワード・ゲイン (または積分項) は擾乱の除去を保証する。
  2. しきい値は、非線形ダイナミックスに起因するフリッカを防止する。
  3. 順列はあらかじめ計算する ( 図15 のオフライン・アルゴリズム参照) 。
  4. 役割割り当ては、便宜上マトリクス $\pi$ によって表すが、実際のシステムにおいてはマトリクスの乗算を行わずに、簡略して間接的に求める。

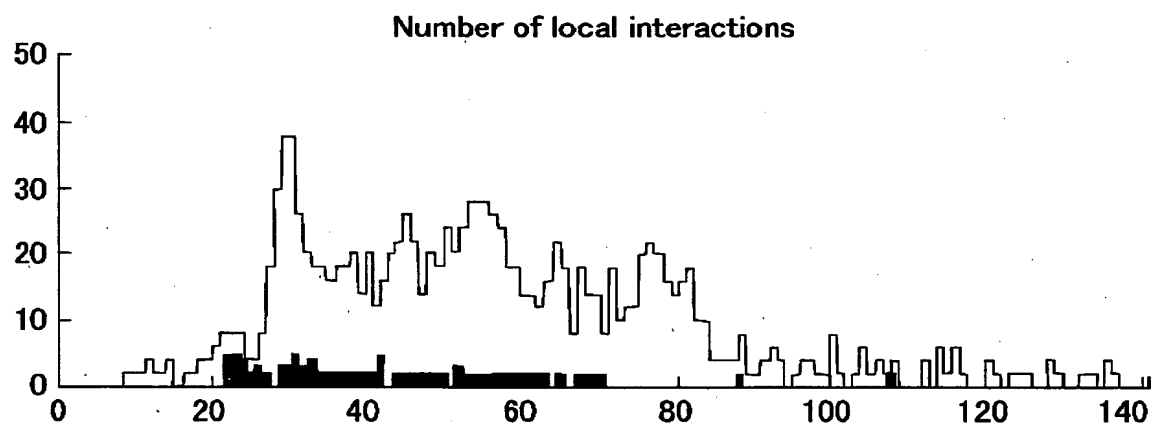
【図 7】

図 7

(a)



(b)



【図 8】

## 図8

ブロック対角システムに関する最適化バージョン (A2)

```

1    $U_n \leftarrow -G[X_n - \pi_n \cdot X_{ref}]$ 
2    $X_{n+1} \leftarrow f(X_n, U_n)$ 
3   For  $j=1$  to  $N$  do
4      $\delta J(i, j) \leftarrow [X_n^j - (\pi_n \cdot X_{ref})^j]^T S^{entity} [X_n^j - (\pi_n \cdot X_{ref})^j]$ 
5   endfor
6   Sort entities by decreasing  $\delta J(i, I)$  and select first  $K$  ones
7   for  $k=1$  to  $K$  do
8     for  $p=k$  to  $K$  do
9        $\delta J(k, p) \leftarrow [X_n^k - X_{ref}^p]^T S^{entity} [X_n^k - X_{ref}^p]$ 
10    endfor
11  endfor

```

最悪のパフォーマンスを示した $K$ 個の個体について役割交換の機会を探す

```

12  For  $K!$  permutations  $\pi(k)$  of  $K$  candidates do
13     $J_\omega(\pi(k)) \leftarrow \sum_{p=0}^H \delta J(p, -X_{ref}(p, \pi(k)) \text{ or target}(p, \pi(k)))$ 
14    if  $(J_\omega > |J_\omega(\pi(k)) + \Delta_{min}|)$  then
15       $J_\omega^* \leftarrow J_\omega(\pi(k))$ 
16       $k^* \leftarrow k$ 
17    endif
18  endfor
19   $\pi_{n+1} \leftarrow \pi(k^*)$ 

```

(1) 単純なターゲットまでの距離を評価基準に用いた場合、役割交換に関するソーティングはアイデンティティ・マトリクスによる $S^{entity}$ の置換に対応する。



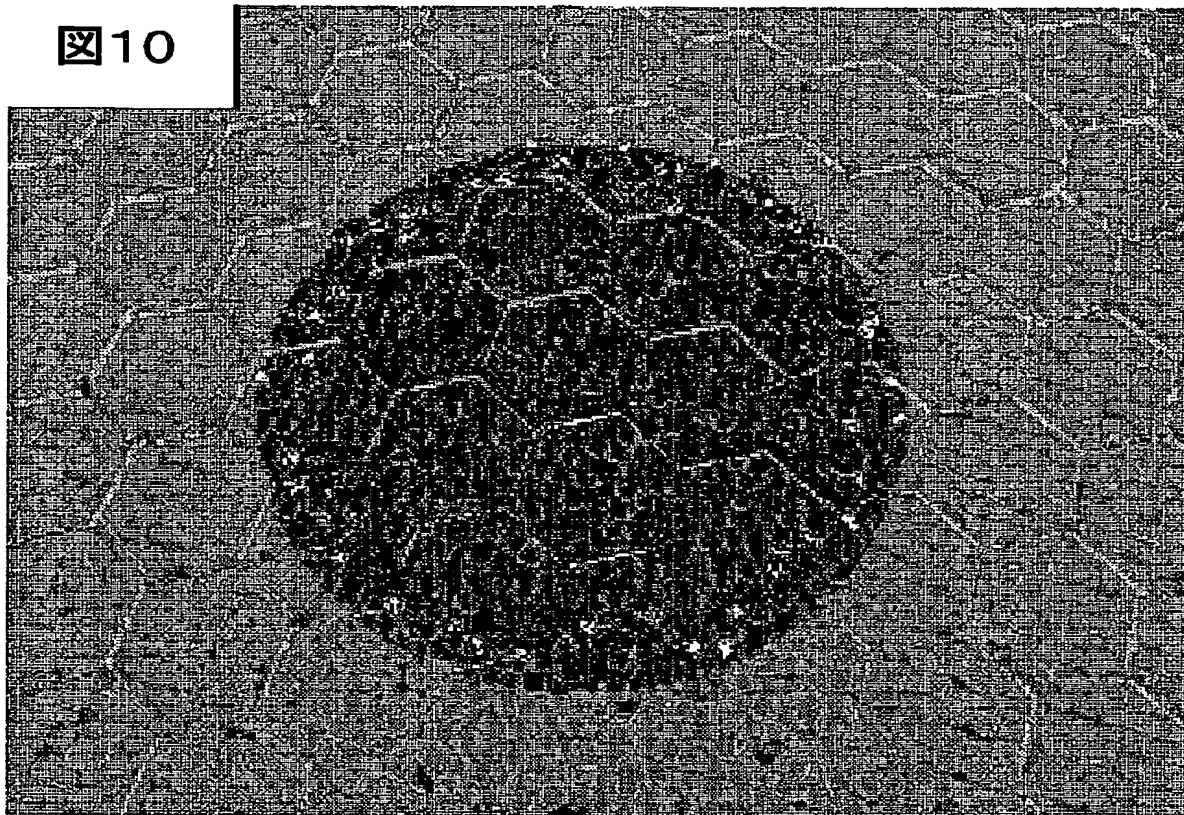
【図 9】

図 9

個体	アル ゴリ ズム	N	n <sub>e</sub>	Nn <sub>e</sub>	協調化	合計/ステ ップ	リアルタイム
魚	A2	6	6	36	8KFLOPS	16KFLOPS	Yes
航空機	A2	6	11	66	14.6KFLOPS	23KFLOPS	Yes
ミツバチ	A1	50	4	200	17MFLOPS	16.8MFLOPS	限定的
ミツバチ	A1	100	4	400	67MFLOPS	68MFLOPS	No

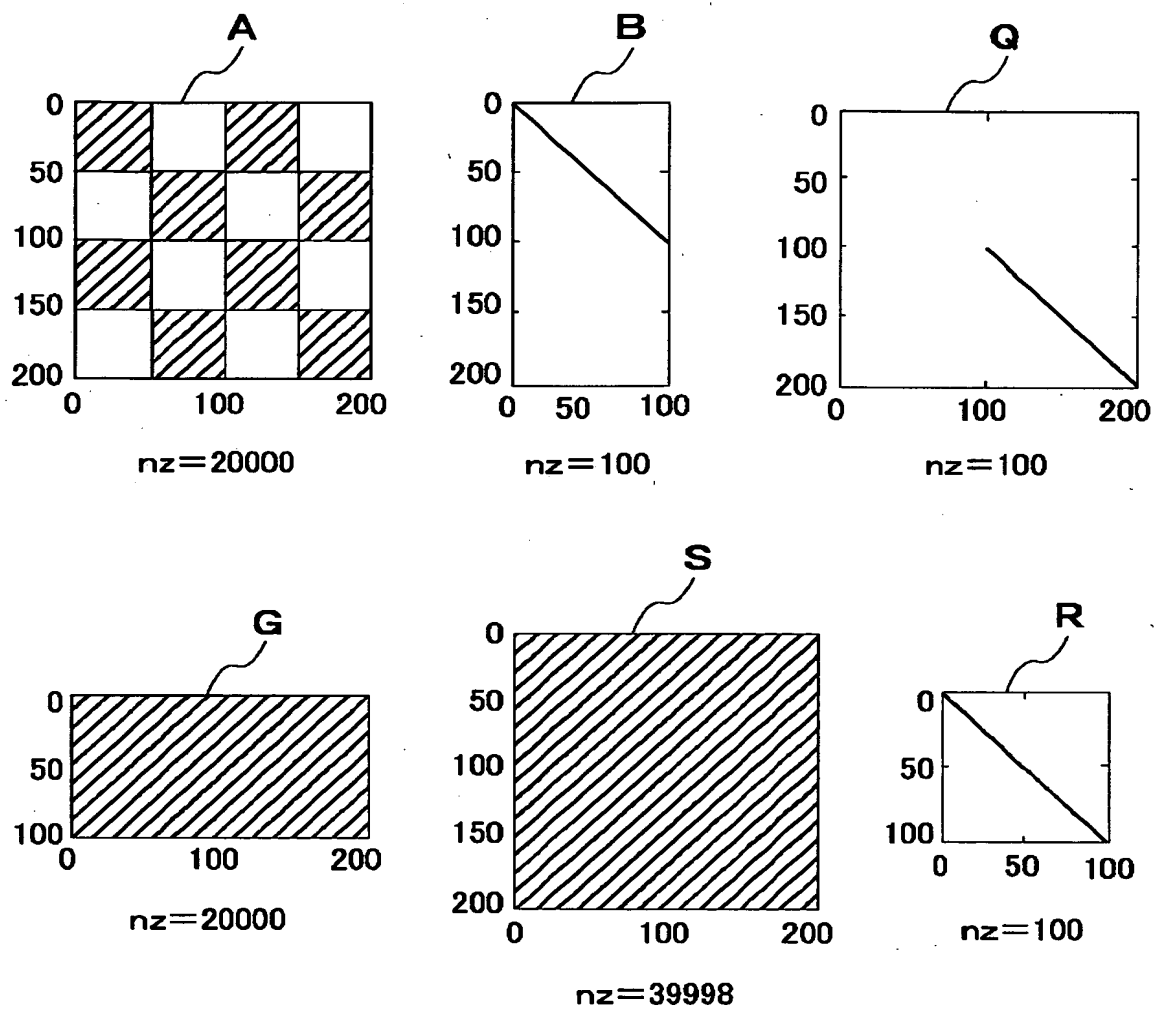
【図 10】

図10



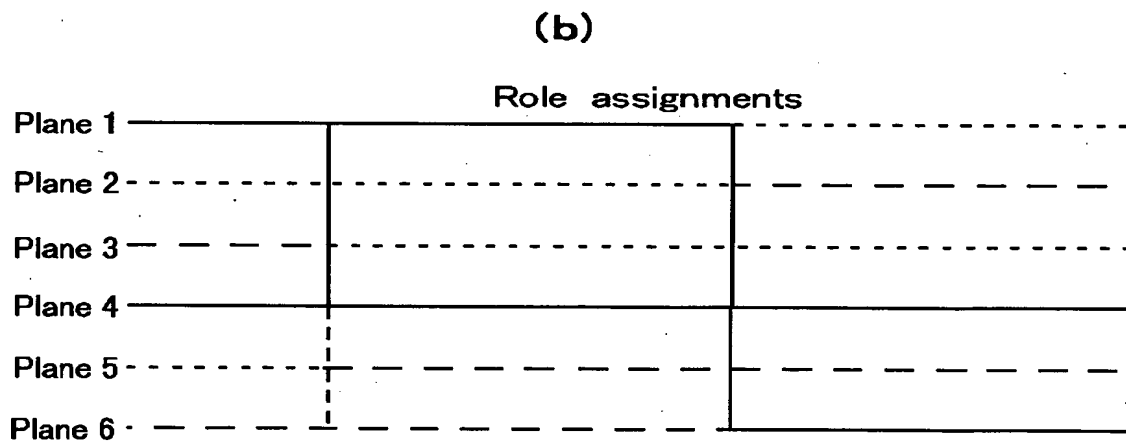
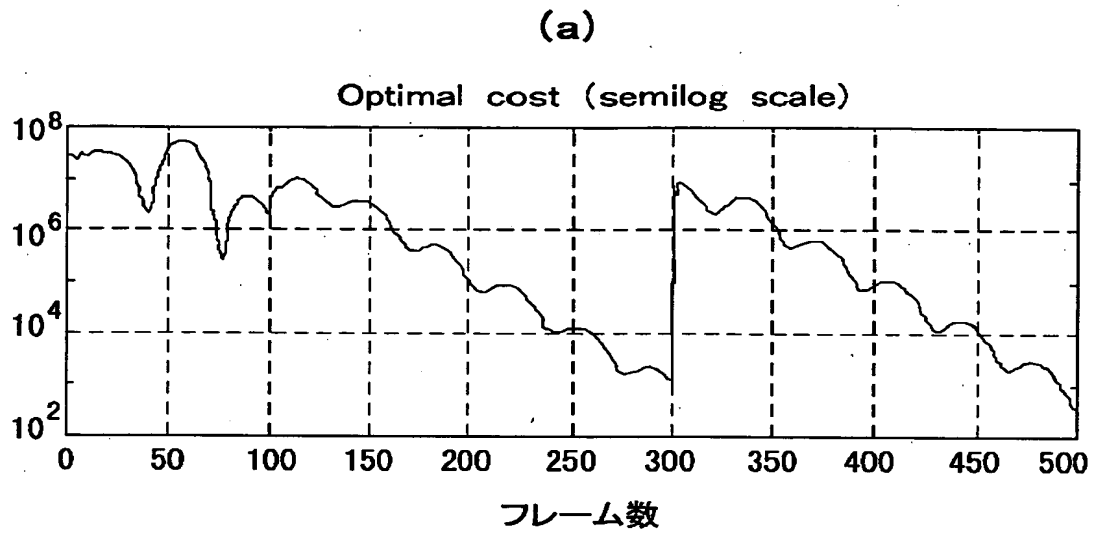
【図 1 1】

図 1 1



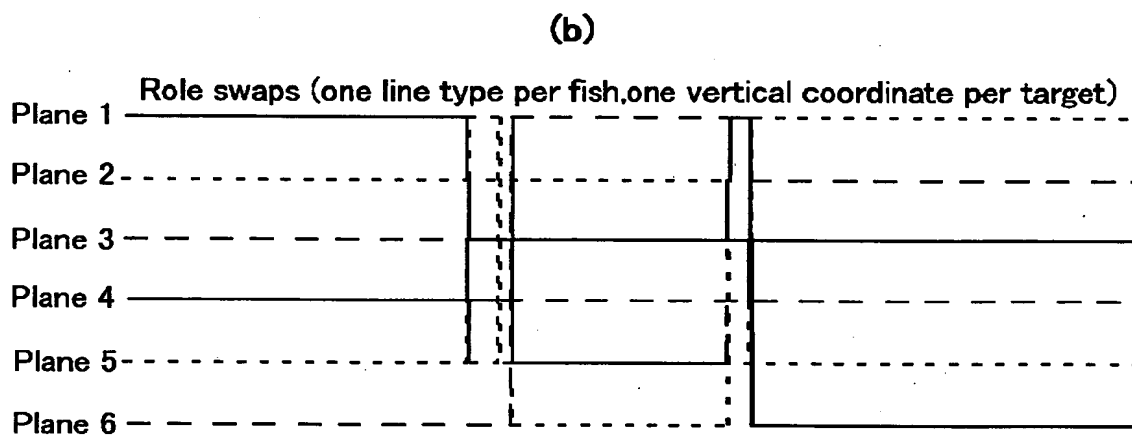
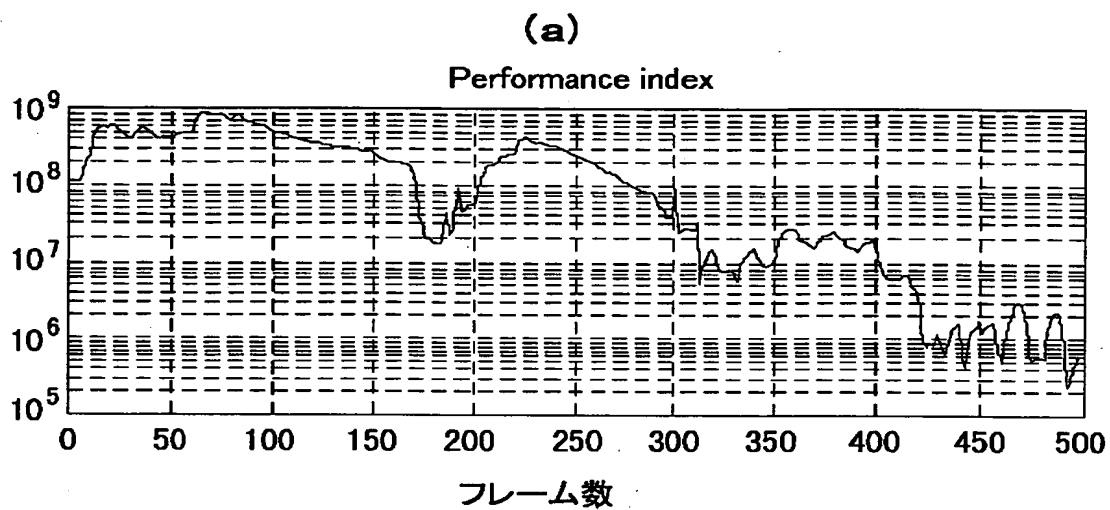
【図12】

図12



【図13】

図13



【図 14】

## 図 14

多変数 LQ 制御合成

1. ダイナミック・システムを A、B、パフォーマンス・インデックスを Q、R として、次のように定義されるハミルトン・マトリクスを形成する。

$$H = \begin{bmatrix} B+AR^{-1}B^T A^T Q & -BR^{-1}B^T A^T \\ -A^T Q & A^T \end{bmatrix}$$

- 2 固有値のモジュラが 1 未満 (閉ループ・システムの定常的な極) となるすべての対を集め、H の固有値および固有ベクトル W を計算する。
- 3  $S_o = \lambda W^T$  を計算する。
- 4 次の式により最適マトリクス K のゲインを計算する。

$$G = [R + B^T S_o B]^{-1} B^T S_o A$$

【図 1 5】

図15

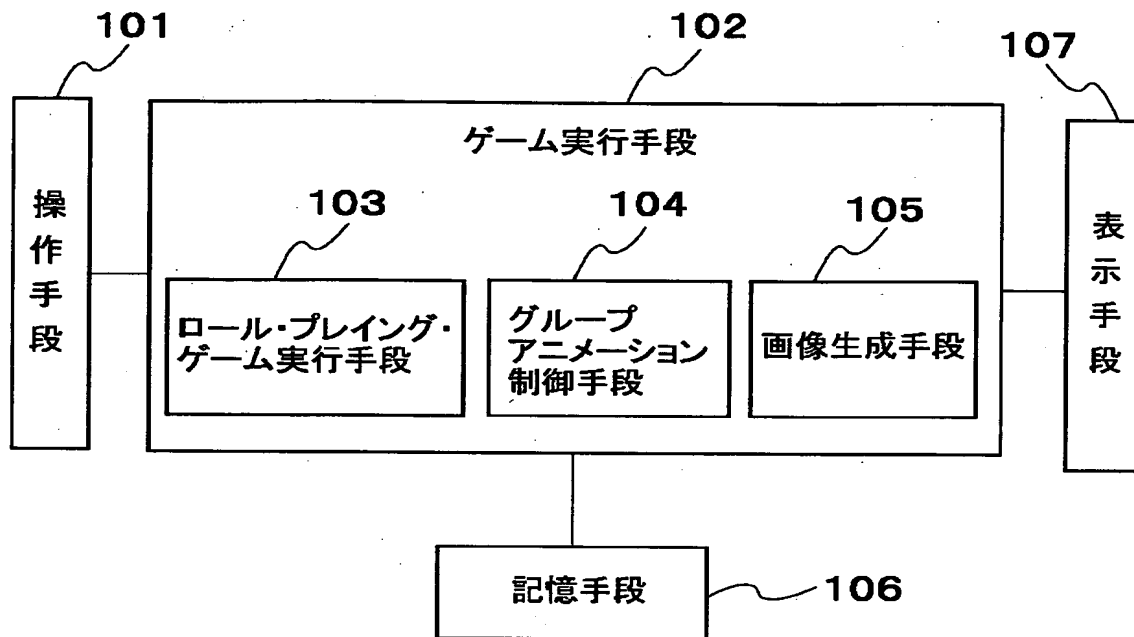
```

Function PermutationArray=Permute(vector)
1      n=length(vector)
2      if(n==1) then
3          PermutationArray=vector
4      else
5          PermutationArray=NULL array
6          Height=0
7          for k=1 to n do
8              sub-vector(k)=ShrinkVector(vector, k)
9              SubArray=Permute(sub-vector)
10             for i=1 to (n-1)! do
11                 for j=1 to n-1 do
12                     PermutationArray [i+Height][j]=SubArray[i][j]
13                 endfor
14                 PermutationArray [i+Height][n]=vector [k]
15             endfor
16             Height=Height+(n-1)!
17         endfor
18     endif
19     return PermutationArray

```

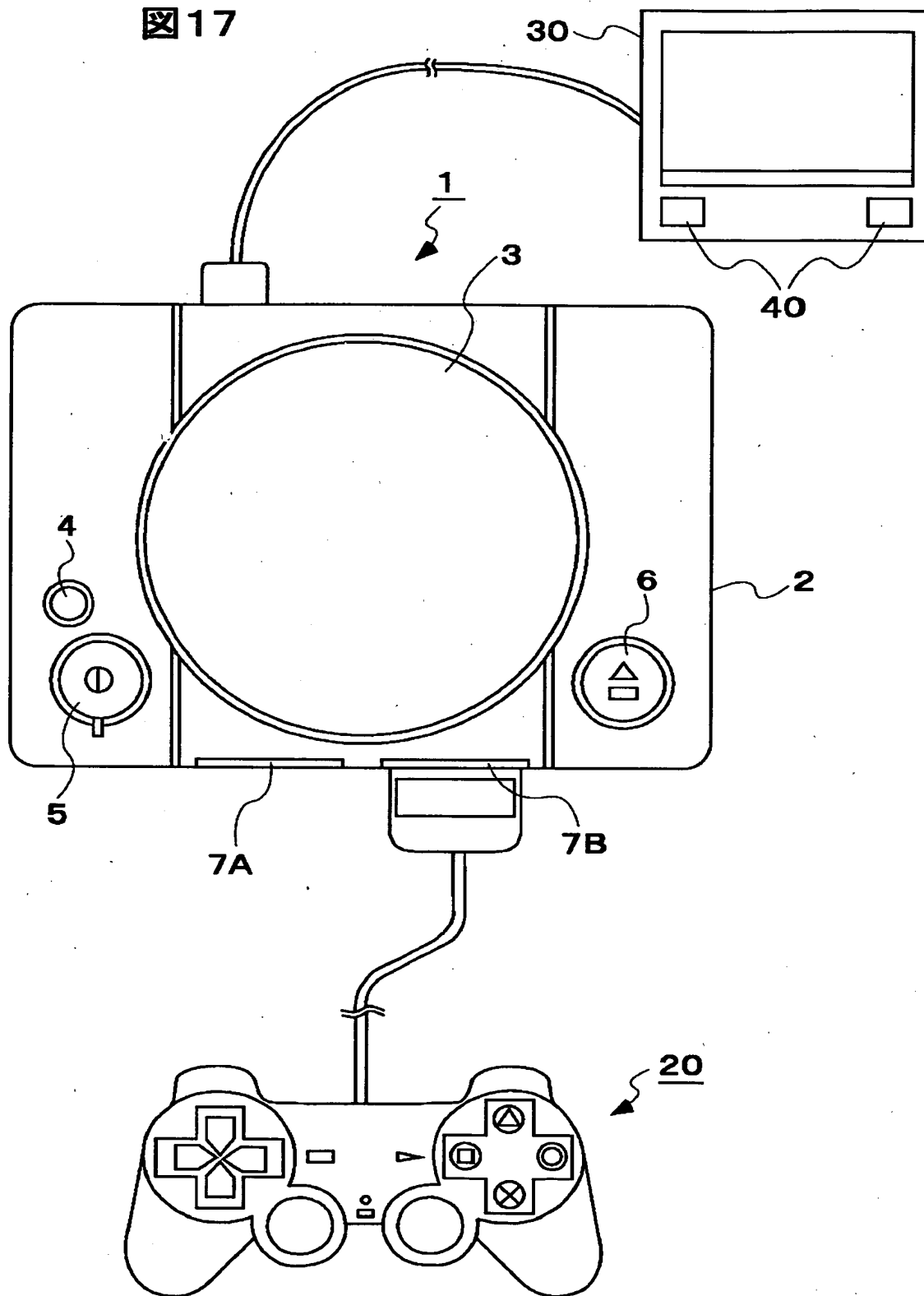
【図16】

図16



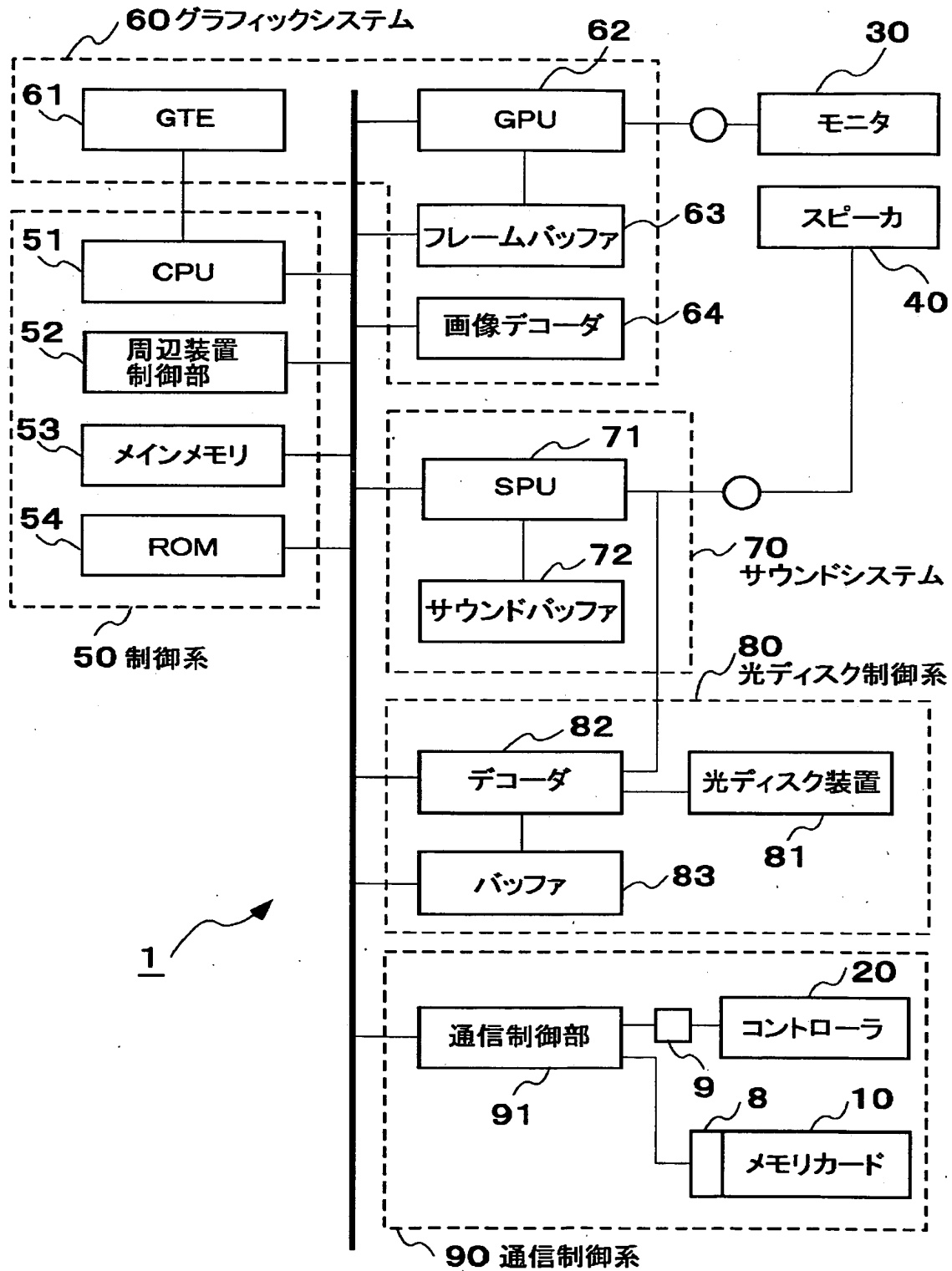


【図 17】



【図 18】

図 18



【書類名】 要約書

【要約】

【課題】 群集アニメーションにおける動的制御を可能とするアニメーションを生成する。

【解決手段】 群集レベルでの特定状態を指定するレイアウト200を実現するように当該群集を構成する各個体に役割を割り当てる役割割り当てスイッチボード201と、役割割り当てスイッチボード201で各個体の役割が割り当てられた参照状態において各個体の状態を連続的に決定する最適連続制御部202aと、外部からの指示や群集の現状に応じて各個体の役割の再割り当てを実行させるよう役割割り当てスイッチボード201を制御する最適離散役割割り当て部202bと、決定された各個体の状態に基づく動特性を記述した変数群 $E_i$ や全世界的な外乱や個体間の相互作用から、各個体の状態をそれぞれ求める個体状態決定部204とを備える。

【選択図】 図2

認定・付加情報

特許出願の番号	特願2001-088013
受付番号	50100429150
書類名	特許願
担当官	田口 春良 1617
作成日	平成13年 6月 5日

<認定情報・付加情報>

【特許出願人】

【識別番号】	395015319
【住所又は居所】	東京都港区赤坂7-1-1
【氏名又は名称】	株式会社ソニー・コンピュータエンタテインメント

【特許出願人】

【識別番号】	000002185
【住所又は居所】	東京都品川区北品川6丁目7番35号
【氏名又は名称】	ソニー株式会社

【代理人】

申請人

【識別番号】	100084032
【住所又は居所】	神奈川県横浜市西区北幸2丁目9番10号 横浜 HSビル7階
【氏名又は名称】	三品 岩男

【選任した代理人】

【識別番号】	100087170
【住所又は居所】	神奈川県横浜市西区北幸2丁目9番10号 横浜 HSビル7階
【氏名又は名称】	富田 和子

出 願 人 履 歴 情 報

識別番号 [395015319]

1. 変更年月日 1997年 3月31日

[変更理由] 住所変更

住 所 東京都港区赤坂7-1-1

氏 名 株式会社ソニー・コンピュータエンタテインメント

特2001-088013

出 願 人 履 歴 情 報

識別番号 [000002185]

1. 変更年月日	1990年 8月30日
[変更理由]	新規登録
住 所	東京都品川区北品川6丁目7番35号
氏 名	ソニー株式会社